新世紀叢書

太空旅行和四次元世界

科幻相對論

審定者：周東川



銀禾出版社　印行

內容小介

科幻小說中許多令人嚮往，目不暇給的科技情景是可能的嗎？或是完全幻想的？本書以相對論的科學理論為基礎來探討太空旅行時會遇到的情景。讀過相對論的人可能在本書中發現您想像不到的事。譬如在一般相對論常常談到羅侖茨短縮，也就是一架快速飛行的火箭看起來以羅侖茨短縮來講應該是扁扁的。而本書告訴我們，可能變得細長，或看起來在旋轉而能看到火箭的尾部等等。這些都沒有違反相對論。為什麼呢？本書會有精彩的說明。

039

新世紀

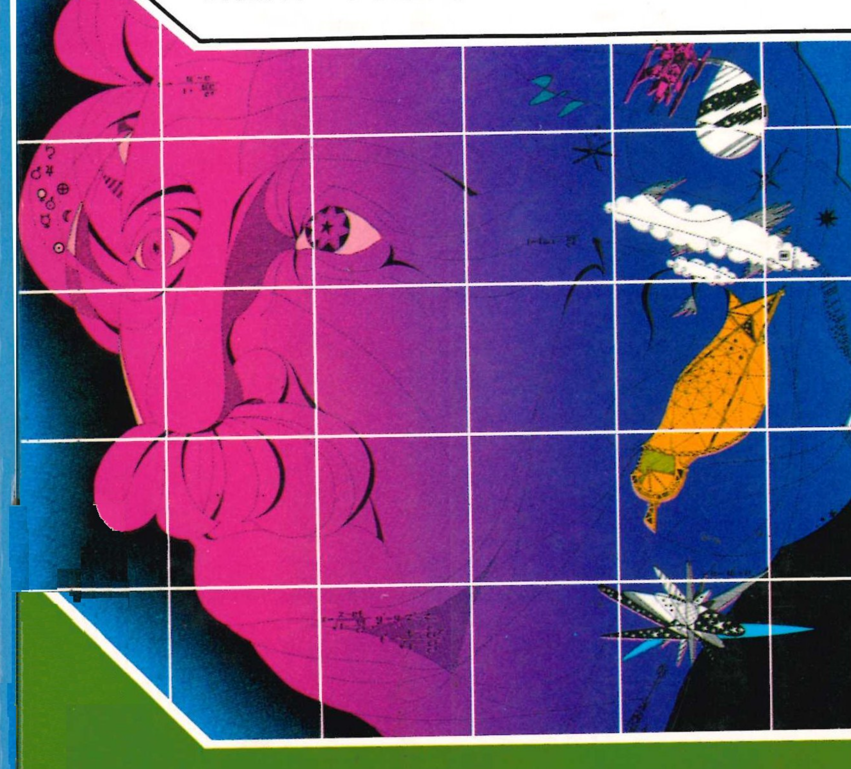
科幻相對論

新世紀叢書

太空旅行和四次元世界

科幻相對論

審定者：周東川





新世紀
銀禾出版社　印行

審定者：周東川教授

●高雄市人
●民國35年生
●清華大學物理學博士
●任教於淡江物理系

新世紀叢書



039

新世紀叢書

科幻相對論

銀禾出版社　印行

目錄

前　言

當我們從接近光速的太空船上觀看地球時，地球看起來顯得很小，同時當太空人到遙遠的星球世界進行太空旅行，回到地球時，他們仍然是那麼年輕，而在地球等待太空人回來結婚的愛人卻已經變成老太婆了，諸如此類的故事，我們可以從科幻小說中找到。

然而這些都是經由愛因斯坦所創的“相對性理論”加以說明的現象，決不是純粹的幻想。

尺度的短縮、時間的延遲或停滯、因星球重力而光線彎曲，甚至於刺激人類夢想的黑洞和白洞、以及陷人類於恐怖狀態的核子武器等，都是經由愛因斯坦的相對性理論加以說明的。

事實上相對性理論不僅是人類有史以來最高度、完整的學問體系，對於我們這種住在常理的世界的人來說，是一種處理最奇異，最能引起興趣的現象的理論。而這種相對性理論的效果，大多是出現在我們目前仍然無法窺視的特別科學技術的世界，但是未來又是如何呢？恐怖不只是存在特別的世界裏吧！未來的宇宙探測器將向超密度星球的重力場挑戰，光子太空船出發至恒星的

世界時，這些我們所能夠實際體驗到的最神秘也是最美麗的現象，將陸續出現在我們的眼前。

這本書的相對性理論並不是針對少數的研究者或學者所寫的，其目的在於使一般人也能夠輕鬆地去理解相對性理論。每一章基於這個目的，內容不是教科書式的記述，而是從科幻小說的立場來加以描述，例如從準光速飛行的太空船的船橋觀望宇宙，在巨大的黑洞四周未來人類所能遭遇到的各種神秘的現象等，重點放在視覺的說明上。

當然這本書決不是沒有根據的虛構小說，我們也盡力對相對性理論的物理意義或理論的結構、表面的現象所隱藏的問題的本質等加以說明。

我們不是完全在說理，而以科幻小說式的解說爲目標，希望讀者能輕鬆地看完它。

一、從太空船看相對論

精神世界的發展在某種意義上，可以說是驚異感情的克服、以及從奇蹟中不斷的脫離。（愛因斯坦）

怪馬星座阿爾發星球的旅程

讓我們首先以科幻小說的立場，從航行於宇宙的太空船的船橋來觀看宇宙。

以準光速飛行的太空船，其飛行的方法和目的有很多種，由於是準光速，它不可能停留於太陽系的內部，當然是航行於恒星之間，不過這是數十光年以至於數千光年的旅行，人類從夢想來回銀河系的旅行，一直到大量移民至其他銀河系的星球，太空船的航行方法在未來可以想像出來是很複雜的。通常太空船以１G（和地球的重力一樣強的力量）加速航行，但有時候在短時間內首先達到準光速，然後再保持一定的速度。關於太空船的最高速度，有時幾乎和光速一樣，有時只能達到光速的百分之七十或八十，所以速度是千變萬化的。

關於太空船的加速方法或續航距離等，由於牽涉到時間停滯的問題，雖然有很多有趣的話題，我們還是將

它留到後面再講。這裏首先提出一些比較可能實現的話題，假想太空船飛往鄰近的恒星系進行探測旅行，對於其航行的速度、狀態等必須加以說明。

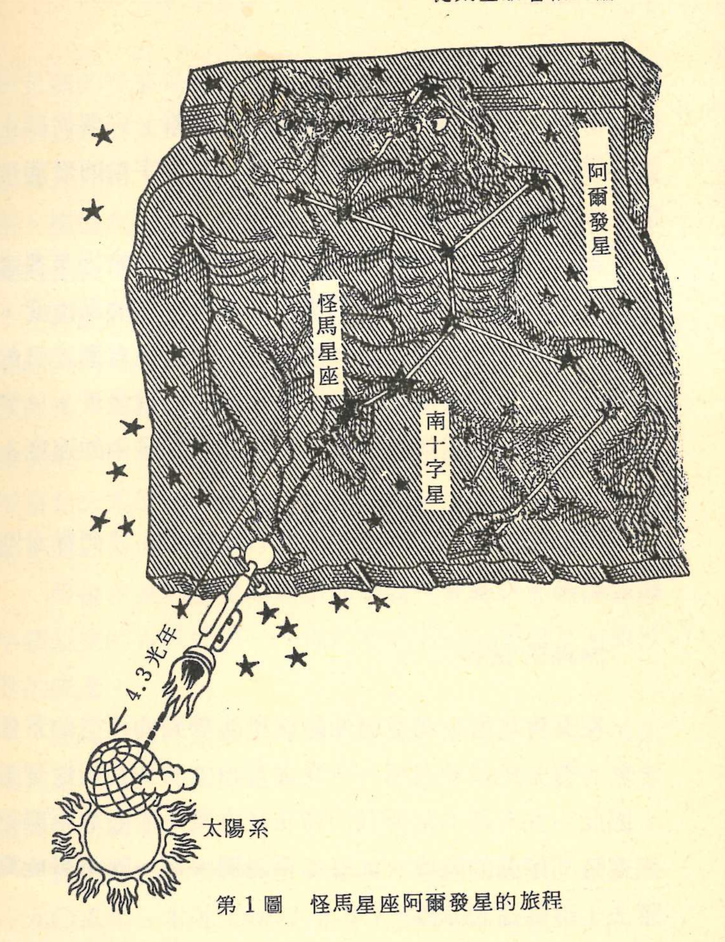
即使鄰近的恒星系，其星球的數目也很多，我們很難做選擇，總之，以最接近的幾個星球做爲目標來探討，離我們比較近的恒星有下列五種。

1. 怪馬星座阿爾發星　四·三光年
2. 巴那德星　五·九光年
3. 天狼星　八·六光年
4. 艾利達奴斯座伊普西龍星　一〇·七光年
5. 白馬座六一號星　一一·二光年

除了太陽以外，這些星球當中對我們來說最容易到達，而且距離也最短的，可以說是怪馬星座的阿爾發星球。

怪馬是指出現在西臘神話身體半人半馬的怪物，阿爾發星正好是在怪馬星座的前脚，我們從南半球可以很清楚地看到阿爾發星，而且在整個天空的恒星當中，它是亮度最強的星球之一。

怪馬星座的阿爾發星的性質（先講分離型）和太陽很相似，而亮度也幾乎相同，和太陽是對好兄弟。因此，那裏如果有像太陽系的行星，其中就會有像地球人一樣的生命存在，人類也就可能到達那裏。



第1圖　怪馬星座阿爾發星的旅程

這裏我們首先想像太空船已航向距離太陽系4.3光年的怪馬星座阿爾發星，然後再來進行我們的話題。我們假想距離較近的恒星，那是因爲除了將來有可能實現

外，還有二個重要的理由存在。

第一、因爲 4.3 光年左右的短距離，只要從靜止狀態的太空船觀望，在航程的任何地點，宇宙的形態幾乎不會改變，而話題也就簡單。

第二、可以假想接近光速的各種速度。旅行至很遠的恒星系，如果無法達到光速百分之九十九的高速度，或者經常只有維持加速度，便可能發生還沒有到達目的地飛行員就去世的情況，而怪馬星座的阿爾發星，只需要 4.3光年的時間就能到達，也就是在想像中的速度上比較有伸縮性。

那麼像這種 4.3 光年的航行旅途中，我們從太空船的船橋，可能看到怎樣的宇宙呢？

伸縮的世界

在具體描繪從太空船的船橋所能看到的天空的景觀之前，首先簡單地說明一下愛因斯坦的特殊相對性理論。因此一些有趣的話題我們留在後面講，而關於距離縮短或時間停滯的理論，如果不再說明一下，就不可能寫下去，這點還請原諒。

對於我們來說，以速度V運動的物體，在行進方向上以$\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$的比例縮短，而$C$是光的速度。這種不

可思議的現象是相對性理論最大的結論之一，最初讀到這個公式的其實並不是愛因斯坦，而是愛爾蘭的物理學家費茲介路，而以數學方式加以歸納的則是有名的勞倫茨。勞倫茨更進一步發現相對的運動體系之間，電磁方程式保持不變，這就是有名的勞倫茨轉換方式。

長度的短縮稱爲“勞倫茨一費茲介路短縮”，同時短縮公式再度回到原來兩個座標系的變換式稱爲“勞倫茨轉換”。但是現在那些式子不是勞倫茨或費茲介路所發明的，而是愛因斯坦的特殊相對性理論的結論，因爲不僅是公式的形態或公式背後隱藏的思想，其創造者仍然是愛因斯坦。

勞倫茨雖然發表了大膽的假設，但是仍然無法脫離牛頓以來的古典思想——也就是普遍的時間擴及整個世界的概念。

愛因斯坦偉大的地方，其實在於他能夠很大方地拋棄被認爲萬古不變的絕對時間的概念，當然絕對長度這種概念也就跟着消失。

愛因斯坦最初談到有關相對性理論的論文，發表在一九〇五年一本叫 *Annalen der physik* 的雜誌上，標題爲（運動物體的電氣力學），內容極爲平凡。達三十頁的這篇理論簡單而扼要，可以說幾乎包含了整個特殊相對性理論。

談到相對性理論的論文，我們可能會想像其中的內容一定非常不容易理解，其實這篇論文對我們來說決不是很難，讀過一般相對性理論入門書的人，我想有一半以上是看得懂的。

所以我們可以說，這部歷史最偉大的論文（運動物體的電氣力學）的價值，並不在於它的難於理解，而在於它打破了古老的概念，創造出新的思想，即使六十多年後的今天，其內容仍然是很新的。

即使目前一些陸續出版的相對性理論入門書，其開頭部份大多依據這部歷史性的論文的意思來敍述，這是個令人讚嘆的事實。

從基本粒子論以至於其他科學的分野，初期論文的內容大都會被逐漸加以修改，或增加一些新的事實，最新解說的書籍目前也有必要，但是愛因斯坦的相對性理論直到目前幾乎沒有追加，可以說在最初出現的當時，就已經成爲定論，這完全是愛因斯坦的天才和他對時空的本質不斷追求的慾望所賞賜的。

下面列出論文的內容，提供大家做爲參考。首先列出成爲特殊相對性理論基礎的兩個公理。

Ⅰ　物理法則不因座標系而改變（相對性的原理）

Ⅱ　光速和光源運動沒有任何關係（光速不變的原理）

其中分爲十點，列記思想內容如下：

①關於同時性的新概念

②距離和時間的相對性

③勞倫茨變換方式

④運動物體和運動時間（勞倫茨——費茲介路短縮和時間停滯）

⑤速度的合成(即使兩準光速相加也不會超過光速)

⑥馬克士威爾（英國物理學家）的方程式轉換

⑦都卜勒（奧國物理學家）效應和光行差

⑧光線的壓力和輻射壓

⑨馬克士威爾的方程式變換（續）

⑩緩慢加速的電動力學。

看過這十項後，很多讀者一定會很驚奇，因爲它和目前一般的解說書籍並沒有兩樣。下面所要說明的是，航向怪馬星座阿爾發星的太空船，從船橋所看到的太空的情況，我們根據上面所說的項目來加以應用。

目前愛因斯坦的主要論文被翻譯成各種語言，因爲很容易就可以買到。最初論文的原稿於印刷後撕掉，但是一九四三年爲了彌補美國的戰時國債，愛因斯坦親自書寫，拍賣的結果，華盛頓的國會圖書館以六百萬美元買到。

星球顏色的變化

大家等待已久的太空旅行即將出現。談到從準光速飛行的太空船觀看宇宙，讀者首先會連想到勞倫茨一費茲介路的短縮（簡稱勞倫茨短縮）。對有興趣於未來的太空旅行或相對性理論的人來說，剛才所說的平方根記號 v 和 c 的二次平方的方程式，是最普通的公式。

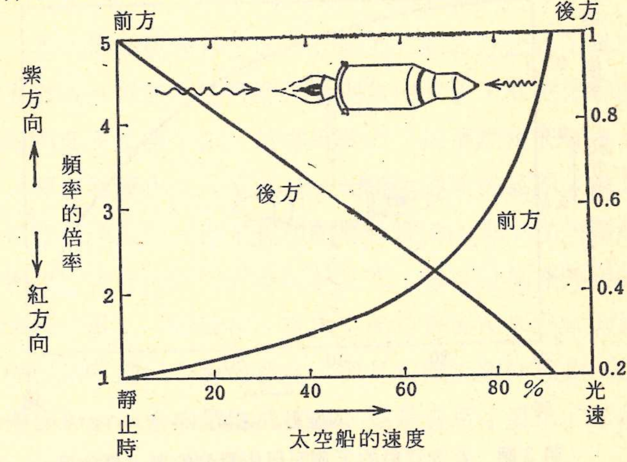
但是實際上還有幾種比勞倫茨短縮更強烈出現的現象存在，其中一種就是愛因斯坦最初的論文第 7 節所談到的都卜勒效果。

關於都卜勒效應的基本原理相信大家都知道，這裏舉出一列駛過的火車的警笛來加以說明。火車逐漸靠近的時候聲音聽起來也越尖銳（頻率增高）、逐漸遠離時聲音就越低沉（頻率減少），就是這種現象，以非相對性理論來探討光線也是一樣。接近光源時頻率增高——亦即從藍色往紫色的變化，遠離的時候頻率減少——亦即橙色往紅色色調方向變化，一般所謂的都卜勒效應可以體驗得到，也就很容易理解。

那麼這種現象在相對性理論的世界裏又是如何呢？當然光線的都卜勒效應會清楚地顯示出來，其傾向和非相對性理論是很類似的，只是其方程式稍微有點不同。根據愛因斯坦的理論，其表現方式如下：

$$\frac{f}{f_0}=\frac{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1-\frac{v}{c}\cos\theta}$$

f_0 是靜止時的頻率，f 爲以速度 v 移動時的頻率，θ 表示方向、探討太空船正面的光源，如正面的星球時，θ 爲零。即使不一樣，其方程式本身並不是那麼難於理解，只要具備高中程度的數學和知識，就能夠充分理解。但是我們沒有必要去計算這個方程式，這只不過是拿來當參考而已。

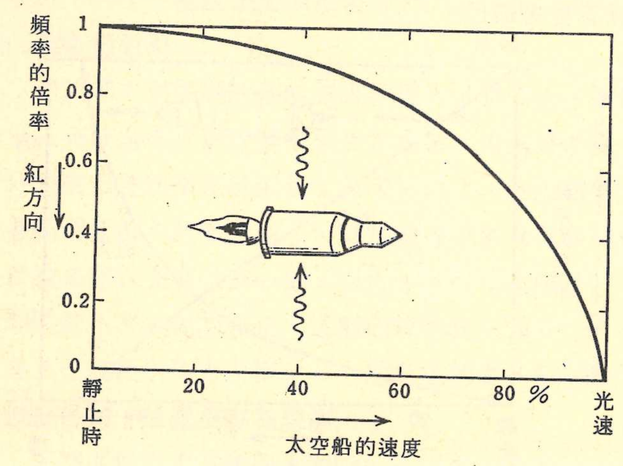


第 2 圖　在太空船前方及後方所能看到的都卜勒效果

然而必須注意一點，和剛才的勞倫茨短縮的方程式比，這種都卜勒效應的方程式，事實上受到太空船的速

度影響很大。

舉出一些簡單的數字，如果太空船的速度還沒有達到那麼高；假設只有光速的百分之二十，這時勞倫茨短縮的效應只不過是百分之二，而都卜勒效應對於前後的星球約出現百分之二十。百分之二十的數字表示黃色的光成爲紅色，綠色成爲紫色等激烈的變化。星球的顏色是由各種頻率數的光混合而成的，總之整個來說前方逐漸朝向紫色，船尾則逐漸轉爲紅色。



第 3 圖　在太空船的正側而所能看到的都卜勒效果
（等於勞倫茨短縮的比例）

再舉出一個具體的數字，現在太空船的速度正好是光速的一半，這時勞倫茨短縮只有百分之十三左右，而

都卜勒效應事實上達到百分之六十～七十。

如果有發出純粹黃色光線的星球，那前方來的會成爲紫外線，從船尾來的則爲紅外線，這兩種肉眼都無法辨認。超過這種速度時（請參照圖表），我想大家都知道其中的變化是很激烈的。

以上是太空船的行進方向，以及相反的方向所能看到的星球的光線，在都卜勒效應下所產生的變化。除了前後以外的方向，例如左右前方或左右後方又是如何呢？

這個答案很簡單，亦即介於前方和後方之間，星球的光線越靠近前方的角度則逐漸傾向紫色，其變化程度隨着角度而緩慢下來，越靠近後方，則逐漸變成紅色。

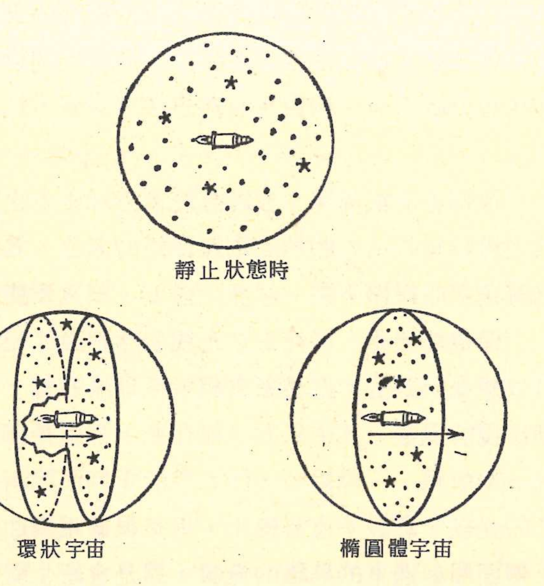
像這種變化，即使不是在相對性理論的範圍，也是可以想像得到的。但是經由相對性理論的都卜勒效應最初出現的現像，其中只有一種存在，那就是側面方向的都卜勒效應，一般說來，從太空船正側面照射過來的星球的光線，應該不會有變化，但是根據相對性理論，從正側面照射過來的星球的光線，還是會產生變化。這種變化以方程式表示如下：

$$\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

亦即和勞倫茨短縮或時間停滯的比例完全相同，這

在物理的意義上非常重要，因爲唯有這種現象，才是特殊相對性理論裏有關時間停滯現象中的一種表現。

因此向怪馬星座阿爾發星的太空船裏的飛行員，才能從船橋認出星球顏色的變化，而且由於其變化的激烈而眼花瞭亂。



第 4 圖　從太空船上所看到的宇宙全體的景觀經由勞倫茨短縮的變化

即使以 1 *G* 持續加速，太空船的速度在航行途中仍能超過光速的百分之九十，這時朝向目的地怪馬星座阿

爾發星的可視光線，全部成爲紫外線（一部份接近X線！）相反的面向太陽的方向，其可視光線全部變成紅外線。

這種極端的都卜勒效應，還可以提供其他各種有趣的話題，例如從目的地送來的微波信號會變成雷射，從地球發射的無線電波會變成極不能接收到的長波等，也可能發生雜音時增時減的現象，對太空船的通信技術人員來說的確是一個很麻煩的問題。不過關於都卜勒的效應就暫時談到這裏，現在移到下一個問題。

大家都知道都卜勒效應使得太空船的飛行員眼花瞭亂，而最重要的勞倫茨短縮，又是如何出現的呢？速度如果達到光速的百分之八十、九十，短縮率也會達到百分之四十～六十，因此我們不能夠忽視它的存在。

從太空船的船橋所看到的星球的世界或整個宇宙，到底如何短縮呢？如第 4 圖所顯示的，整個宇宙成爲環狀包圍太空船？或是航行於前後破裂的球形中的光景？

其實只要相信愛因斯坦的相對性理論，以上都不是正確的答案，關於這點有必要再深入一層討論。

移動的宇宙

以近於光的速度逐漸接近怪馬星座阿爾發星球，我們從太空船的船橋所能瞭望的宇宙全景（天球的幾何模

樣），實際上會發生什麼變化呢？

當某種棒狀的物體和太空船交錯而過時，你可能會想到勞倫茨—費茲介路的短縮現象，而認爲沒什麼。但是如果整個宇宙因勞倫茨短縮而發生變化，要想像其中的景觀却格外的困難。

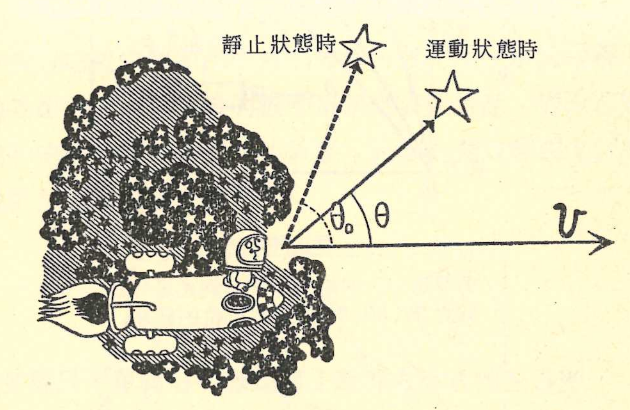
我想有不少讀者曾經再三的想過這個問題，而且也有不少讀者知道，光是單純地引用勞倫茨短縮的原理，是不可能得到答案的，不是嗎？

即使談到宇宙前後短縮，究竟以那裏爲中心短縮呢？如果說以太空船的正側面爲中心短縮，一般人或許這麼認爲，這種必然性又存在於什麼地方呢？假使短縮的方法和我們想像的一樣，那麼從太空船上所看到的星座又是如何變化呢？而且前後的星球又是如何？關於這些疑問的解答，事實上在愛因斯坦的相對性理論的最初論文裏面，已經有清楚的說明。

和都卜勒效果同樣列於第⑦節的“光行差”現象就是在解答這些問題。由於這種光行差的奇妙效果，我們人類能夠記述滿怖於天空的星球的位置關係變化，也就是整個宇宙景觀的變化，光行差現象經常用雨滴的例子來加以說明。雨滴垂直落到地面時，從火車或汽車的窗戶看起來好像是斜着落下，落在窗戶玻璃上的雨滴的軌跡，很明顯的是傾斜着。

用這種雨滴現象來想像遠方的星球所照射過來的光線，就可以簡單地理解光行差現象。這種現象早已在一七二七年被英國的天文學家布拉得里所發現，恒星的位置以一年爲周期，描繪出小小的橢圓。

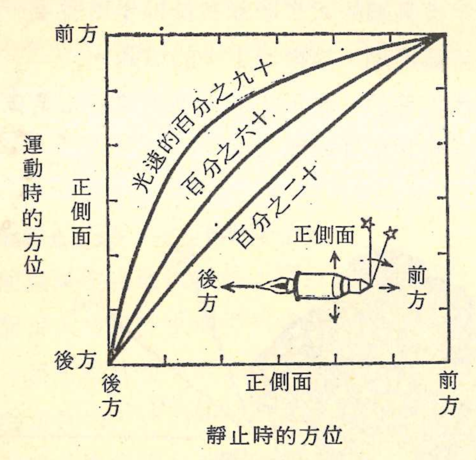
當然正確的、眞正的光行差現象最先是經由愛因斯坦的特殊性相對理論所證明。



第 5 圖　隨著太空船的加速遠方的星球的方位向前方移動

如第五圖所示，遠方的星球的位置，隨着太空船速度的增加，逐漸朝前進方向移動，這就是光行差現象的特徵，稍微想一下，就像船在前進的時候，所看到的東西也跟着前進，這的確很奇妙，但是這裏以遙遠的星球爲對象（大部分的星球比距離地球 4.3 光年的怪馬星

座阿爾發星還遠），其實也不值得大驚小怪，因為落在火車窗戶上的雨跡，也是向前方傾斜的……。



第 6 圖　太空船的速度達到光速的百分之 20，60，90 時星球方位的變化

光行差的方程式和都卜勒效應一樣簡單，只要是高中程度應該可以理解，根據愛因斯坦的表現方式如下：

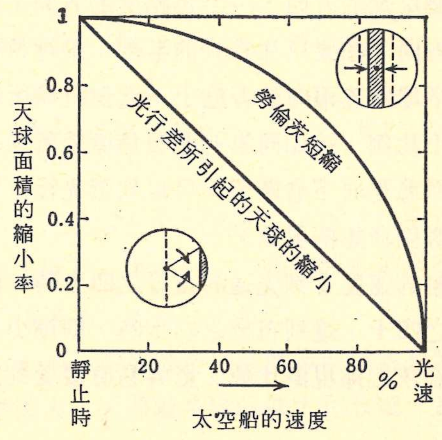
$$\cos\theta_0 = \frac{\cos\theta - \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}\cos\theta} \qquad \cos\theta = \frac{\cos\theta_0 + \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}\cos\theta_0}$$

和剛才的方程式一樣，v 為太空船的速度、c 為光速、θ_0 如第五圖所示為靜止時的星球的方位，θ 代表運動時的方位。

將這個方程式以太空船的速度、光速的百分之二十、六十、以及九十來計算時，就如同第六圖所顯示的形狀。

這裏的主旨，並不是對於數式進行詳細的說明，雖然描繪出結果也是其中的一個目的，但是關於公式的性質仍然要特別注意。

那就是經由公式所表現的光行差現象，事實上比勞倫茨短縮現象所顯示的還要強烈，這和剛才所說的都卜勒效應一樣。以較難的數學用語來表現的話，勞倫茨短縮和速度的關係是間接的效應，而都卜勒效應或光行差現象則是直接的效應。



第 7 圖　經由光行差所引起的天球面積的縮小率遠超過勞倫茨短縮

所有的星球集中於前方

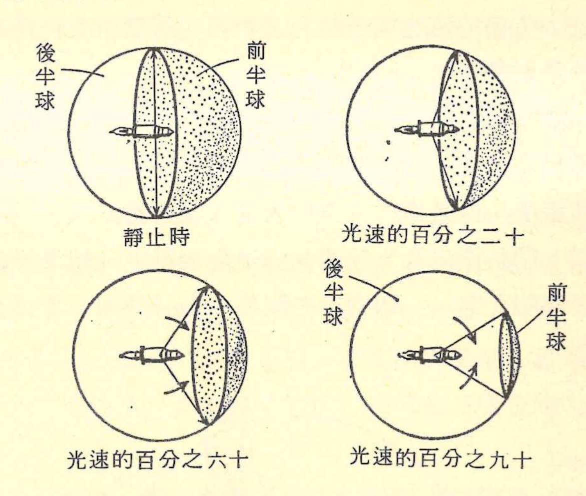
爲了簡單說明光行差現象是如何頻繁地出現，我們畫了一張天球面積的縮小比例圖形。第七圖上面的弓狀弧形，是假定因勞倫茨短縮現象而看起來天球面積縮小的比例，從這張圖我們可以知道，即使太空船的速度達到光速的百分之六十，也只不過縮小百分之二十，而如果速度在百分之四十以下，則不會有顯着的縮小效果。

但如果是光行差現象，又大大地不同了。光行差是星球的位置逐漸向前方傾斜的現象，現在假設分爲兩部份來考慮，一半爲太空船行進的方向，也就是朝向怪馬星座阿爾發星球的方向，一半爲相反的方向，也就是朝向太陽的方向，如果只注意到前半部，飛行員眼睛所看到的巨大半球將逐漸向前方縮小，這個時候所看到的天球面積縮小比例，就如同第七圖對角直線所顯示的一樣。縮小比例愈是向下愈厲害，可以知道光行差現象的效果遠高於勞倫茨短縮現象。

太空船的速度達到光速的百分之四十時，面積也縮小至百分之四十，達到百分之六十時，則縮小百分之六十，和勞倫茨短縮現象比較，更容易直接受到速度的影響。

那麼關於光行差現象所引起的宇宙的變化，我們再

具體的說明一下。爲了更簡單地顯示出因光行差而引起的各個星球的位置變化，我們將整個宇宙分爲太空船的前方和後方兩個半球，並以圖形來加以說明。

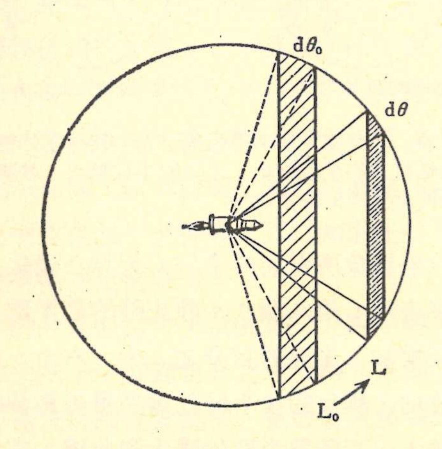


第 8 圖　光行差現象所引起的宇宙（天球）的變化。太空船前方的半球縮小，後方的半球擴大，結果是大部分的星座向前方集中。

因光行差現象所引起的宇宙（天球）變化，以四種球面圖形來表示（第八圖）。靜止時的前半球，隨着太空船速度的增加（光速的百分之二十、六十、九十），逐漸向前收縮，相反的後半球就像要覆蓋整個船的前部一樣逐漸擴大，而隨着半球的擴大和收縮，當然包含在裏面的星星也就跟着擴散和密集。

太空船的速度如果超過光速的百分之九十，就如圖所顯示的，前半球的大部份星球集中於行進方向的正面，同時後半球的星球也大部份移動到前方正面的附近。如果太空船的速度幾乎和光速相同，那麼所有佈滿在宇宙的星球將集中於前方的一點。

在我們假設的太空旅行中，後方的一點也就是只有太陽留在後方，其他星球都往目的地怪馬星座阿爾發的周圍集中，但是由於後方的太陽本身也會擴大，同時也有都卜勒效應以及光線的減弱等現象發生，結果形成渺茫虛無的太空，一切的存在都集中在目的地，您說不是嗎？



第 9 圖　天球帶子 L_0 裏面的星球移動至寬度縮小的帶子 L 的裏面。

伸縮的帶子

現在我們已經知道，太空船以準光速航向怪馬星座阿爾發星，如果以太空船爲中心將宇宙分爲兩個半球，則前半縮小後半擴大，下面我們將各部分再詳細的探討一下。某個星球，例如處女座或仙后座，是怎麼變化的呢？

爲了探討這種變化，首先將天球（宇宙）分爲幾條一定而寬度較小（微小角度）的帶子，如第九圖所描繪的這條帶子，其位置隨着太空船速度的增加，因光行差而開始向前方移動，也就是說帶子裏面的星座一起傾向前方，同時帶子的寬度發生變化，星球的密度也跟着發生變化。

前面說過，最後所有的星座向船頭方向密集，然而在途中也會產生有趣的變化。簡單計算一下帶子寬度的變化情況，其結果和都卜勒效應的比例完全相同，從船尾向側面方向逐漸擴大，接近船頭的部份比靜止時縮小很多。同時我們從第九圖立刻可以知道，如果天球上的帶子移動，其周圍的距離也一定跟着變化，其比例仍然和都卜勒效應一樣。

因此我們可以下結論說，剛開始靜止時左右後方的星座，譬如仙后座首先向前後左右擴大，然後其位置逐

漸向前移動，從後部到側面方向，等移動到前半球時，其前後左右開始縮小，在斜前方的某個地點恢復原來的大小，後來急速的縮小，和所有其他的星座集中到船頭方向的一點。另一方面，最初在前半球的星座，譬如處女座並沒有擴大，只是不斷縮小，逐漸向前方移動，最後和所有的星座一起向船頭的怪馬星座阿爾發星接近。

這種星座大小的變化程度也是我們料想不到的。因爲眼睛所能看到的星座大小的變化，也就是星球和星球的間隔變化，而這種變化和都卜勒效應一樣，由於眼睛所能看到的距離如果以勞倫茨短縮現象來說是不大有變化的。我們已經強調過都卜勒效應比勞倫茨短縮變化更厲害。因此星球和星球的距離也比勞倫茨短縮的公式變化更厲害，而且距離不只是縮短，有時也會急速地擴大。

這種表示宇宙上的距離的變化，也同樣適用於其他方面，例如光線強弱的變化，視線方向的距離等，也以同樣的比例產生變化。

關於太空船三種速度，這種重要的關係表現在第十圖，整理後如下：

根據都卜勒效應

①光的頻率的變化 f/f_0

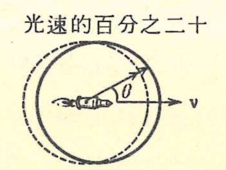
②光的波長的變化 λ_0/λ

③視線方向的距離的變化 r_0/r

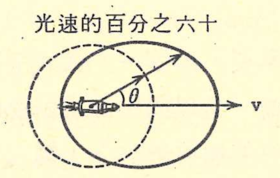
靜止狀態時



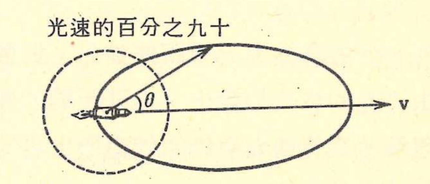
光速的百分之二十



光速的百分之六十



光速的百分之九十



第10圖　從太空船的窗戶看星球數量增加的情形

根據光行差現象

④天球帶子寬度的變化 $d\theta_0/d\theta$

⑤天球上帶子的周圍長的變化 L_0/L

⑥星球和星球的間隔的變化 D_0/D

⑦距離方向的星球數量的增加方式 N/N_0

另外還有

⑧星球光線強弱的變化 E/E_0

所有這些變化都比勞倫茨短縮的效應大，其關係方程式都是

$$\frac{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1-\frac{v}{c}\cos\theta}$$

公式忘掉無關緊要，但第一，從太空船的窗戶所看到的一切景觀的變數，是以同一公式表現的（只有星球的位置例外，因光行差而有變化），第二，這些公式擁有比勞倫茨短縮更具效果的性質……這兩點必須永遠記住。

另外，③的視線方向的距離變化，根據都卜勒效應，這是由於光的波長的變化，亦即距離的變化。這些不但要去理解，在想像太空船的舷窗所出現的景觀時，這些解釋是具有意義的。

還有星球的密度，也就是狹小的面積內所含星球的

數量，隨着關係方程式的平方而增減，而面積的變化則是距離變化的平方。

從太空船的窗戶所看到的景觀

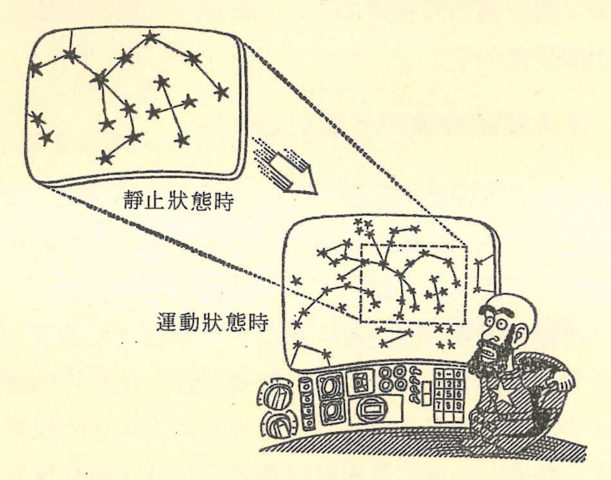
在我們決定航向距離 4.3 光年的怪馬星座阿爾發星的途中，從太空船的船橋所看到的大宇宙的景觀，經過以上詳細說明後，應該可以想像出來。

持續加速度的太空船，在船尾可以觀望太陽系，在船頭可以觀望目的地怪馬星座阿爾發星，在航行的途中，它的速度達到了光速的百分之九十以上，那時觀望用的巨大舷窗所映出的景觀可以說相當奇特，而唯有等到太空船的速度減慢的時候，我們的眼睛才開始能夠辨認出這些奇特的景觀。

大宇宙星球的變化，可以用下面幾點來加以說明。

(A)所有的星球和星座，隨着太空船速度的增加，逐漸向前進的方向移動它的位置，最後密集在船頭前面的一點，船的後部所能看到的星球也不例外。理論上船尾方向的一點是不動的，而事實是最後它將從視界消失。

(B)隨着移動、星球的光的頻率（即色彩）也發生變化，其變化情形爲太空船的前方是紅色逐漸變成藍色，後方則是藍色逐漸變成紅色。當太空船的



第11圖 太空船前方的星座一邊移動一邊縮小，星球密集在一起。

速度超過光速的百分之九十時，所有可視光線，船頭方向變成紫外線，船尾方向變成紅外線，結果是剛才還看得見的星球全部消失，而僅能以特別的視測機器才能夠知道它的存在的黑色星球這時開始發光。另外太空船正側面的一些星球的顏色，也逐漸變成紅色。像這種位置的移動和頻率的移動互相配合，或許可以在斜前方看到一條環狀的星帶包圍住怪馬星座阿爾發星。

(C)隨着星球顏色的變化，其光線強弱也跟着變化，

也就是在可視光線時其光度會有變化。強弱變化的情況和一般想像的一樣，越是向太空船的前方越強，越是向後方則越弱。

(D)另一方面，星球密集的程度也一樣，越是太空船的前方則越大，因此從星星的世界照射到太空船的光線，行進的方向急速增強，反方向則急速減弱，使宇宙的亮度嚴重偏向一方，只有船頭的方向強烈刺激飛行員，當然那時所能看到的光線爲靜止時所不能看見的紅外線。

(E)天球上的距離，也就是星球和星球的間隔，前方縮小而後方至側面方向則擴大。其縮小和擴大的比例，經常超過勞倫茨短縮的比例。

(F)從太空船到星球的視線方向的距離，以雷達測定的話，很明顯地是越前方越縮小，越後方則越擴大，那是由於星光照射在眼睛所引起的距離感，受到光線強度的影響而產生的變化。

(G)大部分的星球根據光行差現象的公式來變換它的位置，但是在非常接近的星球時，或許並不按照這種公式來改變位置的。比較近的星球，仔細考慮一下的話，可能隨着太空船的行進而向後方逐漸消失，就像坐火車從窗戶看景色一樣，離的越近的東西很快就流過去。因此距離非常近的星球

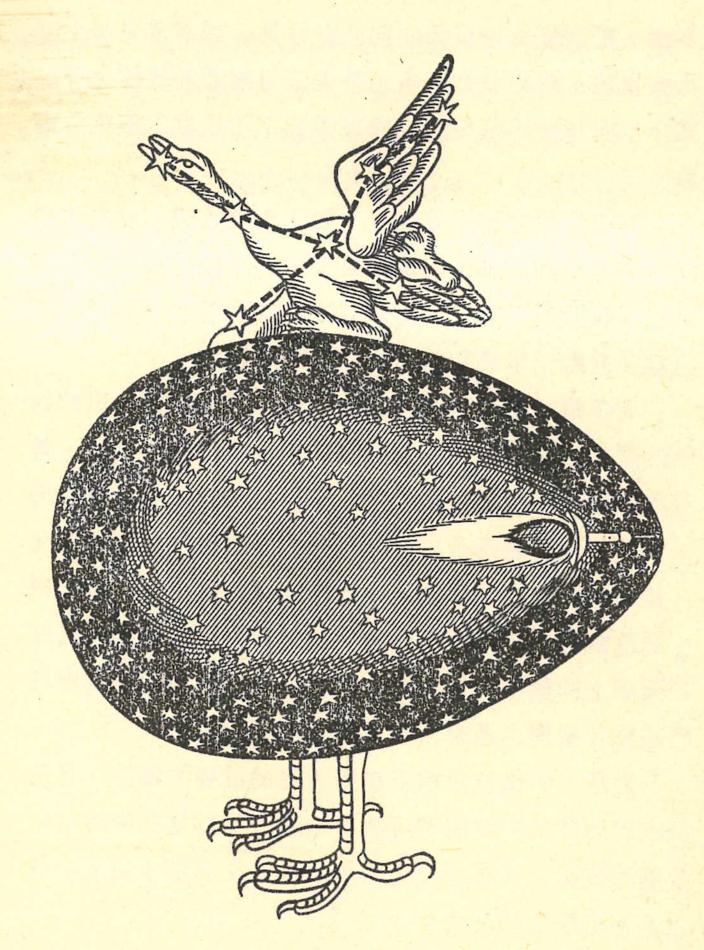
，比較不可能因光行差現象而向船頭方向移動，大多是因靜態相對位置變化而向船尾方向移動，和遙遠的星球剛好相反。

(H)以上是物理及幾何學上景觀的變化，那時我們對整個宇宙的感覺又是如何呢？想敍述飛行員向太空船的船橋眺望宇宙景觀時的感覺，確實要有相當的幻想力，由於一行一行記下來沒有趣味可言，因此才大膽想像飛行員的實際感覺，繪成第十二圖，以準光速朝向怪馬星座阿爾發星航行的太空船，從船橋所觀望的宇宙就像一個雞蛋，太空船正衝向蛋型宇宙的尖端部，撥開四周強烈的光線。

以上所說的或許有不少的脫節或幻想，但也是這一章的結論。

結論的出現使我們再度想起勞倫茨短縮，我們知道都卜勒效應和光行差現象在效果上都比勞倫茨一費茲介路的短縮強，但勞倫茨短縮終究沒有列入結論裏面，那個很熟悉的公式 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ ，究竟是到那裏去了呢？

本篇所記載的結論，雖然多少和一般科幻小學和科學圖書不一樣，但是其中一部分說明偶爾也可以從這些書裏面發現到，如因勞倫茨短縮的現象而收縮成環狀的



第12圖　從準光速航行的太空船所看到宇宙爲雞蛋型？

宇宙，受到光行差現象而向前方移動，或者首先發生光行差現象，然後整個宇宙因勞倫茨短縮而前後縮小等，其中也有用勞倫茨短縮現象來說明宇宙景觀的變化的書籍。

到底何種才是正確的呢？眞正的解答或許沒有實際看到是無法找出來，但是如果宇宙的景觀是按照特殊相對性理論而發生變化，就像剛開始時所說的，這個解答已經在愛因斯坦最初的論文中就可以找到。

大多數的相對性理論的入門書都這麼記載，以相對性的原理和光速不變性爲出發點的特殊相對性理論，其基本在於「勞倫茨轉換式」，光行差現象或勞倫茨短縮，以及其他現象都是以這種轉換式來應用於特定的情況，並導論出來的。因此，以這兩種現象應用於一個問題，是重複應用相對性理論的，如果肉眼所能看到的星球在天球上的變化，是由於光行差現象所引起的，那麼我們基於什麼理由還要再考慮勞倫茨短縮呢？

當然，勞倫茨短縮爲相對性理論重要的歸結，是理解我們居住的空間所不可缺少的概念，即使在探討宇宙景觀的變化上沒有很大的功用，但是在理解宇宙的本質上是不可缺少的公式。

下一章是關於和太空船極接近而交錯而過的物體，例如奔向太陽系的外星人的太空船，他們的形狀看起來

有何變化？我們將做各種深入的探討，同時從這裏，我們將可以獲得勞倫茨短縮的公式所無法想像的奇妙結論，打破目前談到有關相對性理論，並先就連想到勞倫茨短縮的固定觀念，同時我們也將探討一下有關勞倫茨短縮在物理上的意義。

二、交錯而過的太空船的形狀

因此，我們不可能給予「同時」這個概念以任何絕對的意義，但是……。（愛因斯坦）

時鐘和距離的故事

科幻小說經常以描寫地球人的太空船和外星人的太空船在天際的銀河中相遇，彼此建立感情，有時候也發生戰爭爲主要內容。這些書大多是詳細描述外星人的身體的形狀或太空船的外觀，但是對於逐漸靠近，遠離的外星人的太空船的形態，却幾乎沒有精確地描繪過，這一章就是要來探討這點的。

繼續航向怪馬星座阿爾發星的巨大太空船，如果和來自其他的世界而航向地球的外星人的太空船交錯而過，那麼我們眼睛所看到的外星人的太空船，其形狀又是如何呢？

當然宇宙那麼遼濶，太空船彼此之間交錯而過的機會是非常小的，即使碰到這種情況發生，彼此之間一定會交換信號，而且如果過於接近，彼此也會去注意不要受到力學或電磁氣等的影響。

然而高速交錯而過的其他飛行物體投射在眼睛的形態（經由高度攝影技術所記錄的像），在靜止的時候，其形態又是如何呢？這是一個很有趣的問題。由於火箭技術的發達，使我們將來有機會用視覺來觀測以準光速飛行的物體，而到那個時候，探討有關由相對性理論所解釋的形像的變化，決不是一件沒意義的事。

我們在上一章敍述了遙遠的星座的變化，而這章將說明有關通過太空船附近的物體，從太空船的船橋觀望時的各種現象（雖然說是觀望，其實以準光速經過太空船旁邊的飛行物體，我們的肉眼是不可能辨認的，這裏所說的觀望，應該解釋爲經由高度發達的照相器材所看到的。）

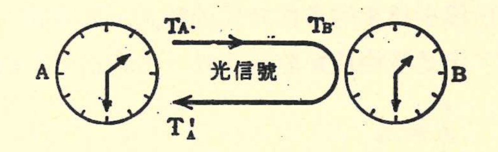
我們於第一章已經強調過，在討論遙遠的星球之間的位置關係時，有名的勞倫茨短縮的公式是不能直接適用的，換句話說，在觀測經過太空船附近的物體時，首先仍然要考慮到勞倫茨短縮的公式是否能夠適用。

這個答案，在理解勞倫茨短縮的公式在物理上所具有的意義後，就自然能夠得到。亦即是否具有說明從太空船窗戶觀測宇宙的物理內容，自然就會知道能不能夠適用，因此我們將回到原來的地方，再重新溫習一下。

其中一點也就是第一章所說的，愛因斯坦論文的第①節同時性的概念。關於兩個不同場所的時鐘是否指着

同樣的時間，究竟我們應該如何來判別呢？如果認爲時間是絕對性的，那就不會有這個問題了，但是如果站在承認時間的相對性這個立場，則不弄清楚的話，就會越來越混亂。當然時間必須配合伸縮的世界，因此將兩個時間調整相同，是很不容易的！

「在什麼情況下時鐘才算是對準呢？」愛因斯坦在特殊相對論的開頭，就討論到有關同時刻的定義的問題，而且將這個問題做爲討論的重要基點。書上所談論的同時性，以下做個簡單的說明。



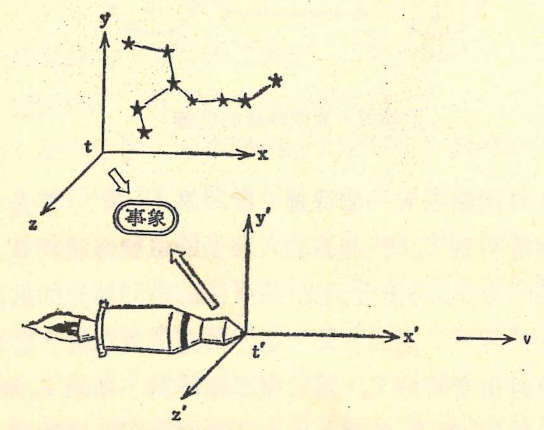
第13圖　對準時鐘的定義

A B兩點各有一個時鐘（參照第 13 圖），首先A的時鐘指着時刻T_A時，那裏的人將光的信號傳送到B。假設B在時刻T_B時接受到光，接受到的瞬間將光的信號（用反射波即可）送回A點，送回的光信號到達A的時鐘時，時針指着時刻T'_A，關於這三種時刻，如果T_B和T_A的差等於T'_A和T_B的差，$T_B - T_A = T'_A - T_B$這種關係成

立時，這兩個時鐘才是愛因斯坦所說的「對準」（同時化），當然即使看起來對準的兩個時鐘，其他觀測者看起來不一定對準，這是必須注意的。

或許你覺得話題越來越複雜，其實這個定義和我們的常識並不互相矛盾，在特別的情況下，兩個被固定的時鐘，其間靜止的人看起來如果是同時刻的話，可以說兩個時鐘「對準的」，這是極爲合理的定義。

第二點也就是關於論文第③節"勞倫茨轉換式"的重要性。儘管特殊相對性理論的基礎在於相對性的原理和光速度不變的原理，但我們自然必須徹底理解，從這兩個原理所導引出來的各種結果的數式，總合在於勞倫茨轉換式（不是勞倫茨短縮的公式，而是從兩不同座標



第14圖　勞倫茨轉換式將從兩個座標系觀看一個事象時的空間和時間結合起來。

觀察的關係式。）

勞倫茨轉換式如第 14 圖所顯示，用兩種座標系觀測一種事象，結合其觀測值。特殊相對性理論是種關係等速直線運動的理論，太空船和星空、太空船和其他飛行物體的關係，都包含在這個轉換式裏面。因此，勞倫茨短縮是否適用，只要將勞倫茨轉換式直接應用到問題上，就自然而然地能夠判定出來。勞倫茨轉換式如第14圖換成座標式時，公式如下：

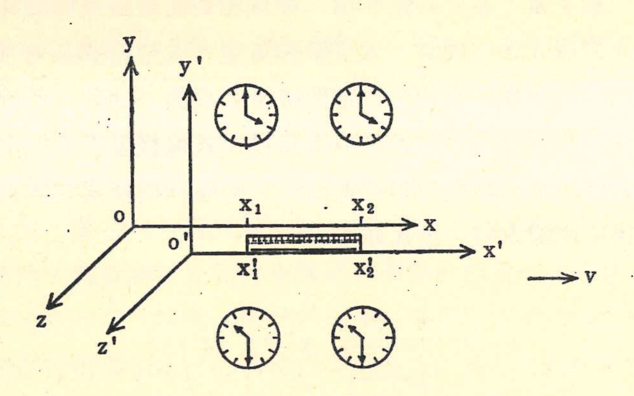
$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad y' = y \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

如何有效的應用這個公式，是特殊相對性理論的重點，所有具體的結果都是從這四種公式產生出來的。

雖然沒有正弦 $\sin\theta$ 或餘弦 $\cos\theta$ 的出現可以說是初學的公式，但是像這樣的數學公式經常出現的話，一些討厭數學的讀者可能會感到厭煩，因此只要將它視爲圖解的代替公式就夠了，這裏並不需要重新解說這種公式。

以上的兩個複習，當我們知道同時性和勞倫茨轉換式的重要性時，再來說明勞倫茨短縮。



第15圖　必須以兩個對準的時鐘來測量尺的兩端

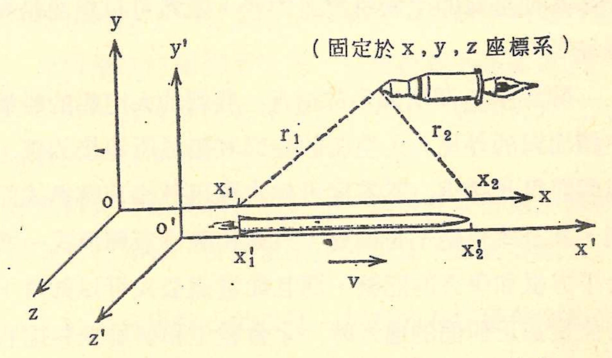
首先請看第15圖。所謂勞倫茨短縮如圖所示，以速度 v 運動而固定在 $x'\ y'\ z'$ 座標的尺，在 $x\ y\ z$ 等座標時以何種長度來測定呢？勞倫茨短縮就是對於這個問題提出解答。在測定尺的長度時，無論如何需要兩個時鐘（當然是對準的時鐘），因為判定長度時必須測定兩端的位置，但是在不同的時間測量位置，是不可敢判定其長度的。

所以在 $x\ y\ z$ 的座標系上準備"對準"的時鐘來求出尺的兩端 x_1 和 x_2，然後再將固定的座標兩端 $x'_1\ x'_2$

和前述的轉換式結合，經由極簡單的演算，由於勞倫茨短縮的公式 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$，結果是尺寸縮短，這就是勞倫茨短縮的物理意義。（第十五圖）

細長的太空船會伸縮

到這裏我們應該知道，勞倫茨短縮現象並不適用於從太空船的窗戶觀望宇宙。



第16圖　和我們的太空船交錯而過的外星人的太空船，看起來是如何縮小的呢？

如第16圖所示，我們所要探討的，在距離量尺（細長外星人的太空船）不遠的地點，從這點來眺望外星人太空船的形態。我們觀測所用的是準備好的觀測器材，

和注視銀幕的肉眼，而不是兩個時鐘。勞倫茨短縮的公式牽涉到時空的性質，我們當然強調這點的重要性，但是想擴大至從宇宙船的窗口觀測宇宙，很明顯的這種公式是不可能的，只要參照兩個說明圖，這點應該可以了解得到。

再來我們所要探討的是，當外星人的太空船經過我們的太空船旁邊的時候，它的形態看起來到底像個什麼。首先我們假定細長的太空船如同量尺一樣可以簡單處理，我們不知道看起來像鉛筆的太空船是否實用，因爲那是其他星球的生物所製造的船，當然可以想像船體極爲細長。

關於第16圖所顯示的情況，我們的太空船的船橋和交錯而過的外星人太空船的船頭和船尾所連接的線，可以假設爲 R_1 和 R_2，其答案可經由應用勞倫茨轉換式而得到，其公式也絕不是很難，只是和勞倫茨轉換式一樣包含平方根和平方的記號，而且從這個公式可以知道，只有位置在正側面的遠方時，才會發生和勞倫茨短縮相似的變化。

那麼一般又是如何呢？要全部說明是一件相當麻煩的事，因此我們假定其他星球的太空船的航程和我們的太空船非常接近，這麼一來公式就比較簡單，而且可以分爲太空船逐漸接近時，以及逐漸遠離時兩個情況來考

慮。這兩種情況於圖形中以實線來表示，這兩條實線，對於從太空船的船橋觀望宇宙的我們來說，實在具有其奧妙的性質。

細長太空船逐漸接近時，觀測起來好像比實物要長，而且其伸長的比例也不是百分之十或二十，當它以光速的百分之九十經過時，事實上其伸長比例達到四倍以上，如果雙方都是準光速，相對的速度爲光速的百分之九十五，那麼比例可能更高，或許超過六倍以上。

另一方面，逐漸遠離時的鉛筆型太空船，相反地看起來卻急速地縮小，而其縮小的情形下列第十七圖所顯示的，比勞倫茨短縮還要激烈，只要相對的速度達到光速的一半時，就可以縮短至百分之六十，達到百分之九十的速度時，長度就只接近百分之一了。

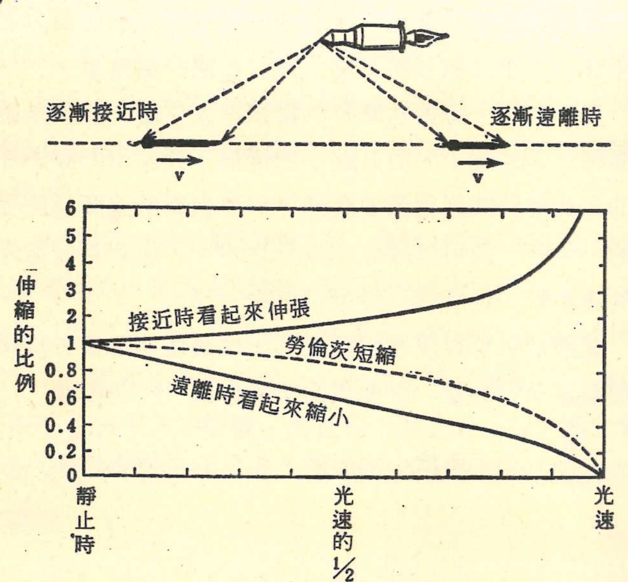
這種結果可以說相當驚人的，以高性能的攝影器材捕捉經過飛行物體，所顯現出來的影像，不是根據 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ 公式所縮小的形態，相反的是極端伸縮的形態。

歪斜的太空船

爲什麼會有這種意想不到的現象發生呢？其原因又在那裏？船體看起來伸長這種非常奇妙的現象，在物理

學上應如何說明？

經由「光的速度是有限度的」這個事實的認識來求得答案可能比較容易。人類觀看物體或是拍攝物體都是經由光來進行的，因此在我們進行從太空船的窗口觀看宇宙的推理時，必須結合勞倫茨轉換式和幾何光學來解釋，這是利用時鐘和尺來考慮勞倫茨短縮最大不同的地方。



第17圖　眼睛所能看到的伸縮比例

最初將光學和勞倫茨轉換式結合在一起的，一般認

爲是發現宇宙黑洞的有名學者 *K*. 片羅茲，時間在一九五九年。而且在那一年，詹姆斯・塔雷爾進一步研究了有關棒形和球體的問題以來，受這些研究的啓發，在二、三年之間，有很多人詳細地做了不同形狀的研究，並且發表出來，目前已經告一段落。

一九六〇年，V. F. 懷斯克普發表了立方體並不是縮小，而是迴轉，他並且探討了以準光速經過太空船的物體，我們所看到的球狀是如何變化的。力外朱里亞斯・蘭寧卡研究有關棒狀的變形，羅伊・懷因斯坦發表了有關一次元的棒形長度。一九六一年，L.M. 伯斯發現球體無論在怎樣的位置，怎樣的速度所行進下，看起來都不會是變形的。其他如H.A. 亞特沃塔、C.W. 夏溫、G.D. 史特格、M.R. 拜那等學者，都在一九六二年以前，解答了同樣的問題。

這一章也就是將這些研究成果以科幻小說的立場加以應用和說明，而其中最有趣的是大總管愛因斯坦本人和勞倫茨對這些問題的看法。

關於這點可以這麼說。首先，比愛因斯坦更早提到勞倫茨轉換公式的H.A. 勞倫茨，聽說他在（理論物理講解）這本書作裏面，提到“這種短縮可以拍攝成照片”，亦即完全誤解剛才的公式，於是愛因斯坦於最初的論文第④節中，做了以下的說明。

『靜止狀態下測量時，如果從靜止系眺望處於運動狀態的球形剛體，則呈 $R\sqrt{1-(v/c)^2}$，R，R 的回轉橢圓體，也就是雖然看不見球的 y 方向和 z 方向的尺寸因運動而變形，但可以看見 x 方向的尺寸以 $1:\sqrt{1-(v/c)^2}$ 的比例短縮，亦即 v 越大短縮也就越大。$v=c$ 時，所有的運動物體從靜止系觀看時，都成爲縮小的平板狀』。

在這篇文章裏面，關於"眺望"或是"看"，愛因斯坦到底是持何種想法來分別，目前還不知道。但是其他人在他還活著的時候所寫的一些有關相對性理論的啓蒙書，愛因斯坦並沒有加以糾正，從這點看來，他並沒有研究過和光學有關的操作。

當然用這件事來責備勞倫茨或愛因斯坦是不應該的，因爲這些偉大的科學家們只是在探討時空的本質，並不是研究從太空船船橋所能觀望的宇宙或高速飛行物體的攝影技術，而且這裏所記載的任何結果，毫無疑問地都是根據他們的公式。

即使在目前，關於這個問題所做的思考仍然有錯誤，同時直到現在，大多數通俗的解說書，仍有表現不正確、刊登錯誤的圖解的事情發生，本來勞倫茨短縮的現象是很難相信的，接近光速時東西會短縮這個理論，大多數剛接觸的人都不太敢相信，但是在相對性理論的權

威面前，即使這種理論過於神秘，也逐漸被人相信了。

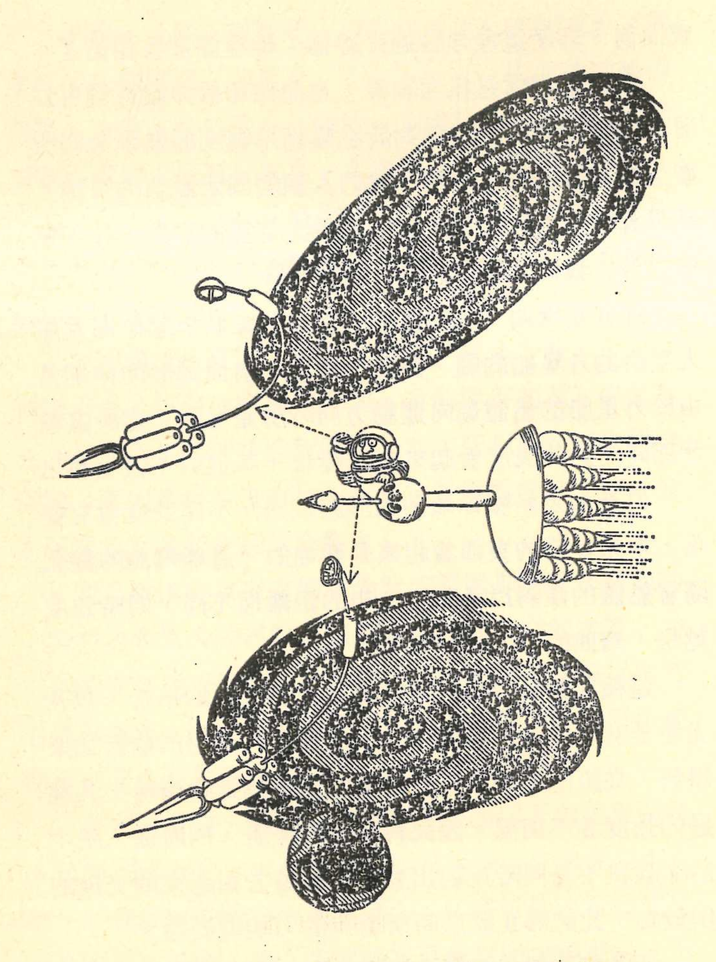
在大家相信這種理論後，也開始相信肉眼應該可以看到短縮的物體。這種對於脫離適用範圍的數學公式所產生的錯誤信仰，說明了我們人類的固定觀念的可怕。話再說回來，關於鉛筆狀的細長太空船的形象，除了伸縮以外，我們再說明另外一種變形。

那就是彎曲。我們描繪一張以曲線狀形態經過人類太空船的外星船的圖，請各位參考。前面圖形的伸縮是由於外星船的船體朝向運動方向時所產生的，處於這種狀態時，船的長度看起來會有變化，其他則不發生變化。

但是如果船體以傾斜的形態經過，不僅長度會有變化，本來是直的東西看起來是彎曲的，這種彎曲的變化隨着船體的傾斜以及和太空船的距離而不同，同時速度越快，彎曲的方式也越厲害。

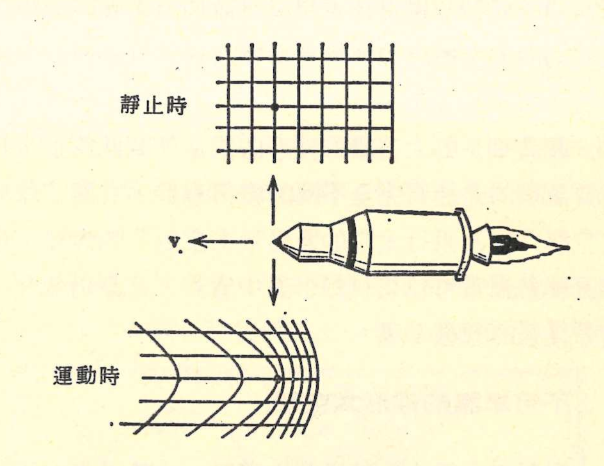
這種現象可以由勞倫茨轉換式和光學的結合，以及光速是有限的這個事實來加以說明。外星船的船體如果傾斜，從船體各部分反射出來的光線到達船橋時，其經過的長度各不相同。因此對觀測者來說，同時進入眼中的光線決不是同時反射出來的，從遠方射過來的光線的出發點，比起靜止狀態時所看到的可能還要遠。

這是解開彎曲船體之謎的一點，而且實際上看起來是非常奇妙的，不僅是彎曲，其彎曲的情況時時刻刻都



第18圖　以傾斜狀態經過的細長太空船看起來是彎曲的

在轉變，而且光線的色彩和強度都在變化。雖然交錯而過只是那麼一瞬間的事，但是獲取那一瞬間的高度攝影器材的記錄，却是幻想趣味很濃厚的映像，可以成爲那些對寂寞的太空旅行感到厭煩的人的消遣。



第19圖　假設太空船經過格子圖形時的變形的情況

要想定量地把握住細長太空船看起來彎曲的現象，是有點困難，我們將想像簡單化，用格子換形來表現經過的外星船變形的樣子，如第 19圖所示。

格子的水平線，可以想像是鉛筆狀的外星船以一直線經過時的樣子，顯示出水平線的間隔的變化在越接近時看起來是伸長，越遠離時看起來是縮短的現象。

同時格子的垂直線，可以想像是外星船以橫倒的姿勢經過時的變形，而且來到眼睛的前面時，其彎曲也最厲害，其他以外的姿態，例如半傾斜經過時，以這個格子圖形的變形爲基本，應該可以推想出外星船的形狀。以傾斜的姿勢經過這種表現或許說明有點曖昧，但是那是我們的太空船以高速經過緩慢前進的外星船的旁邊時，所看出來的姿勢。

關於細長的太空船的變形的說明就到此爲止，再來所要說明的是性質完全不同的幾何形狀，有關“球形的太空船”以及飛行太空的圓盤形太空船”的情況，這種情況雖然經常可以在科幻小說中看到，但是仍然有一些奇奇怪怪的想像出現。

不可思議的球形太空船

在科幻小說中所敍述的太空船，由於表現方法不同而有各種經過多次想像的奇特的形狀出現，其中最具代表性的形狀之一就是“球形”。像星際大戰中的球形物體，其建造過程或許不一定是理想的，但是如果我們假定它造的很好，則其性質有很多是值得參考的。

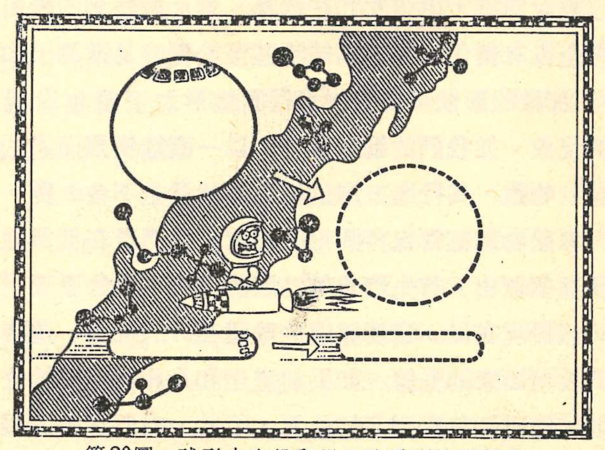
少量的外壁材料可以獲得最大的容積，強度方面均等而沒有弱點，特別是經常在不穩定的靜重力場的太空船，無論從那一個方向看起來，其姿態相同而且堅強的

球體，的確是一個理想的形像。有關球形太空船，例如有名的萬·沃克持所寫的（黑色的破壞者——太空船碧格爾號的冒險）裏面有這麼一段話。

“那個東西從遠方急降下來，本來是一粒小小的光點，瞬間却變的很大，成爲金屬的球形。巨大而閃爍的球體掠過科爾的頭上，緊急剎車後飛越過右方的黑色丘陵，在幾乎是停止的瞬間，已經從那邊消失……。

這個球體也就是太空船碧格爾號，他爲了尋找可怕的宇宙生物，航行至銀河的邊際，當然其速度很快地就可以接近光速。

碧格爾號只不過是球形太空船的一個例子，像這種太空船，我們假想它和我們的太空船在飛往怪馬星座阿



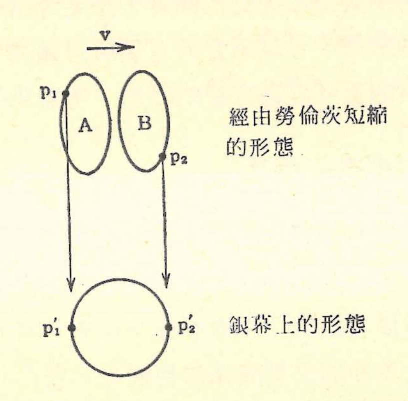
第20圖　球形太空船和從旁邊看到的圓盤形太空船其輪廓都不變

爾發星的途中交錯而過，對於那時所觀測到的形像，確實有調查的必要，我們首先說明球形物體在附近經過的的樣子。

那麼球形物體經過時，所看到的形像是什麼樣子？答案非常簡單，如第20圖所示，其輪廓不會有變化。亦即靜止時的球形的輪廓是圓的，但是即使以準光速運動，其輪廓仍然保持是圓的。

這種說法最初認爲稍微遠一點的物體才可以這麼說，但後來才知道任何狀態都能成立。因此，和物體的相對速度無論怎麼快，即使達到光速，我們所看到的還是圓形的周圍，這種結論是非常奇妙的。眼睛所看到的形像和勞倫茨短縮相反，有時甚至於會伸長，這種現象前面已經說明過，但這次和在銀幕、景片所看到的幾何形狀完全沒有變化。從這個結論甚至於更容易推測出如第20圖那樣的形狀，在空中飛行圓盤形太空船也出現相似的現象。從我們的觀測窗口，以一直線橫飛而過的圓盤球狀物體，其行進方向的輪廓形狀還是不會改變。

球狀物體經常保持圓形的輪廓，我們現在簡單地來說明這個理由。首先請看第21圖的輪廓不變的原理說明圖，假設現在以 v 速度經過的球體在A的位置，這時候點 P_1放射出來的光線，如果前進至和 P_2相同距離的位置，則球體已經移動到B的位置。因此，我們這邊的銀幕



第21圖 輪廓不變的原理說明圖

上在某一定的時刻（一瞬間）所顯示的形像，如果回溯到剛才光從物體出發時的那一點，則絕不是在某一個瞬間同時離開各點，比起左側 P_1' 的光線，右側的 P_2' 的光線較慢離開物體。

亦即在不同的時間從物體發射出來的光線，由於同一個瞬間在銀幕上結合形像，即使從正側面看的時候，也不至於形成勞倫茨短縮現象，看起來仍然是圓形的輪廓。換句話說，光速的有限性對銀幕上的形象影響很大。

像這樣和球形太空船交錯而過的機會或許不太多，因爲宇宙那麼廣大，其交通情況不像在地球上那麼雜亂，但是我們的太空船以準光速經過閃爍的恒星，或是環

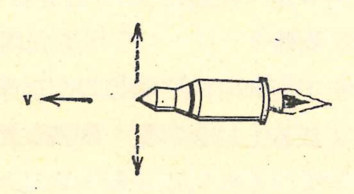
繞在其周圍的行星旁邊的機會，不是非常的多嗎？碰到這種情形當然，可以適合於這裏所討論的球狀物體。無論用多快的速度經過行星的附近，所看到的形狀是圓的。

全部都在旋轉嗎？

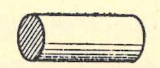
如果球狀物體的周圍看起來經常是圓形的，那麼被圓周所包圍的表面形狀又是如何呢？從球形太空船的舷窗同樣可以看到嗎？那麼好像又沒有什麼太大的變化。

對於表面的位置關係如何變化，我們再來研究一下。在開始討論高速物體的可視像時，其中有一種形狀成爲議論的對象，那就是圓筒，這種形狀比球形可以說更接近實際的太空船。

靜止時

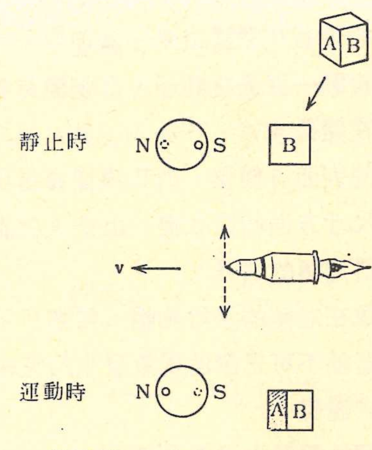


運動時



第22圖　運動時的圓筒從正側面看起來也是廻轉移動

計算的結果如第22圖所顯示的，運動時的圓筒即使從正側面看也像是迴轉前進。所謂的迴轉感覺上如同傾斜的姿勢飛行的樣子一樣，而是否眞正能讓觀察者感覺到，必須在當場才看的出來，因爲受到飛行物體的距離，表面的性質、反射光線的量、觀測機械的性能等的影響，形像也表現出不同的性質。



第23圖　運動時的球體或立方體都給予廻轉的印象

但是觀看幾何形狀的輪廓時，在正側面直線前進時所看不到的圓筒底面，在物理上却是眞正的可以觀測到，而且這種現象和迴轉物體時底面可以看見，其結果非常相似，因此在很多論文裏經常使用迴轉來表示，也有

人認爲不是勞倫茨短縮現象，而是發生迴轉。

看不見的表面能夠看見，飛行物體觀測起來好像在迴轉的這種現象，其實不只是圓筒，如第23圖所示，立方體當然也能夠發生這種現象。來到正側面時應該只能看到B面，但事實上連A面都看得到。

這種現象甚至於也可以應用到球體，同樣地如第23圖，靜止時應該能夠看到的S極，却隱藏在後面看不到，應該看不到的N極却顯露出來。這種現象前面也說過，亦即球形的輪廓一直保持圓形，但是能夠看到的表面，很明顯的是在變化。

如果球體的表面有模樣，則其模樣會呈現出歪斜，而立方體則在尺寸方面稍微改變，但是大致說來，這種現象仍然是因爲迴轉的關係。

看起來好像在迴轉的飛行物體，當然只限於有深度的立體形狀，這種不可思議的現象發生的理由，我們用最簡單的方式來說明。

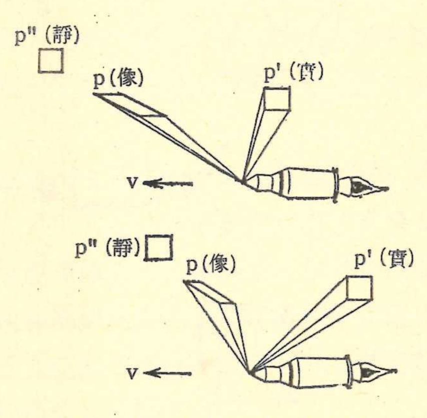
最容易了解的說明方式是在第十二章天球的變化時所說的，以光行差現象來應用在立方體。第24圖 P_1 立方體顯示出原來的位置和形狀，這時我們的太空船以準光速 v 飛行時，入射光線的角度發生變化，亦即由於光行差現象，其形像在P點，看起來應該如圖一樣爲歪斜的形狀。如果是映在太空船裏面的平面銀幕，那麼就像

前圖23所顯示的，我們所能觀測的圖形好像在迴轉。

如果你記得光行差現象，這點應該可以理解。上下圖都一樣，位於相同位置的靜止體P″應是完全看不到的面，虛像P却變形而可以看見，請各位要注意，因爲這是解釋迴轉現像的主要說明。

怪馬星人的太空船經過時

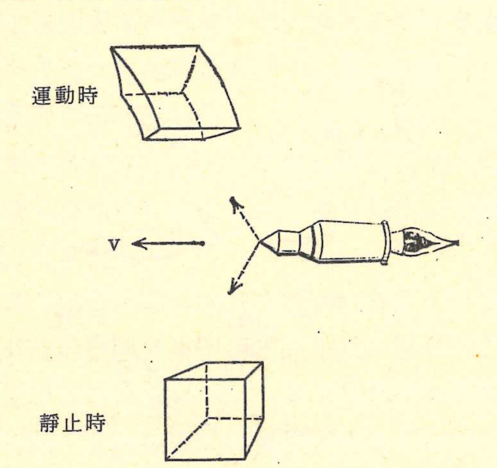
以上關於交錯而過的外星人的太空船，其形態看起來有何種變化，在推理上一些必要的知識可以說都收齊了。再來應該是具體上的描寫，不過在這之前，還有一點必須注意。



第24圖　光行差現象的迴轉說明圖

剛才的解說，大部份着重在“迴轉”的現象，但這些到底是類似的說明，如果想更進一步詳細觀察飛行物體的形狀，還必須注意迴轉以外的各種變化，其中一種是直線的彎曲（曲線化），本來應該是直線的太空船的支架看起來却是彎曲的一種現象。

平面的格子圖形看起來是歪斜的，這種現象我們已經在前面的19圖中強調過，當然這種也可以應用在立體的一個面或邊。因此，和由直線和平面所構成的立方體交叉而過時，其可視像看起來不僅是個迴轉，各部分看起來都呈現出複雜的歪斜。



第25圖　從側面所看到的正六面體的變形和迴轉

將前面的一些圖解綜合起來研究的話，應該可以在腦中描繪出實際的圖形，但是由自己去做時，中途總是會陷於混亂，結果是越搞越糊塗（筆者的腦神經也是很混亂）。

不過一些親切的人，經由正確的計算爲我們描繪出圖形，其構造讓我們看了以後能夠更了解。其中一個例子，關於正六面體的變形和迴轉，用第25圖來表示。在距離很近的地方眺望各邊長度相等的立方體，可以知道除了整個看起來好像在迴轉外，還呈現出奇妙的歪斜，同時也要注意上下的方向不一樣。

甚至於幾何學上最單純的形狀，正六面體都會呈現出這種程度的歪斜，那麼更複雜的太空船，其形狀看起來又是怎樣呢？頭腦如果不淸醒一點，實在很難想像出來。

現在該進入主題了。將這種難於想像的形狀，儘量以具體的方式來表達，當然想像和空想其實是差不多，記述也有可能模稜兩可，但是請各位不要想的太難。

載著代表地球人類的我們，繼續航向怪馬星座阿爾發星的光子太空船在航行中偶然遇到了載著怪馬星人向地球飛行的巨大太空船。

實在很抱歉，在這裏我們假設他們的太空船的外觀，在靜止時是比較簡單的彈丸型，否則變形就會很複雜

，下面的說明也就沒有自信了。

由於日子過於單調而沈悶的飛行員們，有一天精神突然一下子緊張起來，船長發表了重大的消息。

「發現外星船！」

大家的眼睛隨著通知，一起集中在船橋的銀幕上。以準光速飛行而過的物體是不可能用肉眼詳細觀察的，關於這一點，銀幕可用獨特的電眼捕捉所有的光源，然後變換成可視像供給人類觀看。同時可以將瞬間攝取的像緩慢地重播，以解決時間上的問題。

銀幕內前方遙遠的那邊，有一粒光點開始移動，光點逐漸增大，不久前頭灯發出強烈的光線，其光線整個偏向紫外線那一邊，可視光線藍白而刺眼，這是都卜勒效應產生的結果。

看起來它的位置好像在正前方，但是根據儀器的測定，即使直線前進也不會發生正面衝突，將以數十公里的間隔通過。相對速度約爲光速的百分之九十，在恒星船當中不算是很大的，充份注意的話，雙方可以安全的通過，而且還有可能觀測和互相通信。

光點更接近了。用肉眼來觀看映在銀幕上的形態，只能看到一處光的漩渦，但是透過各種濾光器的觀測，那是一艘接近砲彈形狀，稍帶古典風格的太空船，由於



第26圖　經過的外星人太空船的形像概念圖

有相對討論的效果，其全長觀測好像超過一公里，實際上靜止時還不到二百公尺。

在通知測定結果的同時，銀幕上的光點逐漸接近，增加它的亮度，不久光線的強度好像到達頂點，再也不可能更亮，這時候開始逐漸衰弱下來。隨著光的強度開始減弱，光點取出太空船的輪廓，佔據整個銀幕的中央，同時船體的顏色從藍色轉向橙色。

就在這個時候，奇妙的景像使釘在銀幕上的飛行員們吃了一驚。一直朝著正面飛過來的外星船突然開始迴轉，剛才看不到的尾部可以看到，整個稍微歪斜，光線微弱。

船體極度黑暗而呈現紅色，剛才看白色的強烈亮光，好像是錯覺一樣。船體的迴轉逐漸清晰起來，銀幕上出現的是整個尾部。

外星船終於從旁飛過，尾部仍然清晰可見，逐漸遠離，銀幕上只留下一點微弱的紅光，最後終於消失，被銀幕整個迷住的飛行員在船長的叫聲中清醒過來。

「剛才經過的太空船是來自怪馬星座阿爾發星的外星人的船，正載著探險隊員朝向我們的星球、太陽系。我們成功地和他們通信，我們要去的地方雖然種族和地球人不一樣，但仍然很友好地等著我們……」

是不是這樣呢？這是航行中的一段小插曲。

奇異國家的湯姆金斯

將相對理論或量子論的想法以簡單的小說方式加以解說，其中最有名的要算是喬治・格莫的“湯姆金斯系列”。

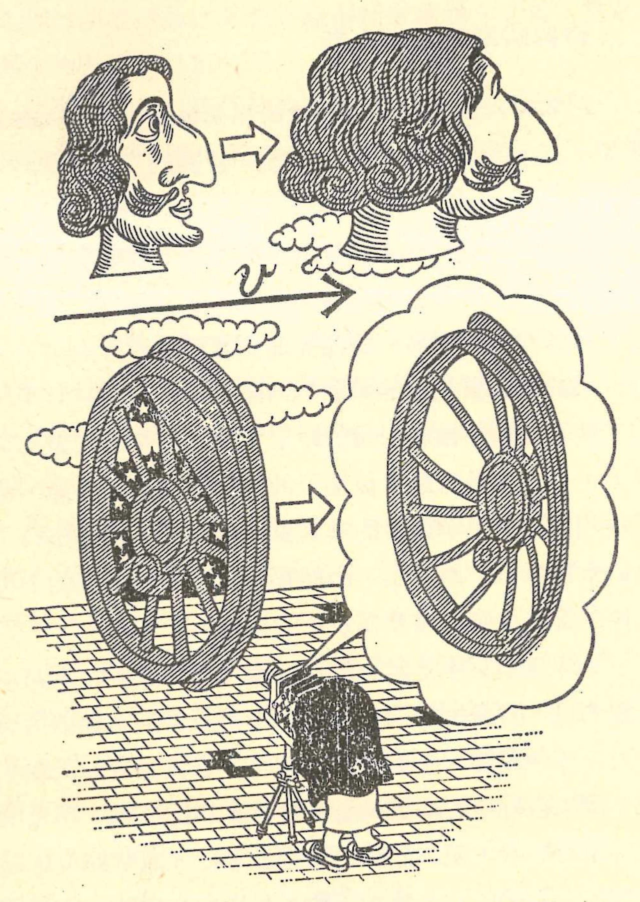
開頭的一節（奇異國家的湯姆金斯）最好有名，應該有不少人已經看過這本書。格莫的小說系列中的圖片也最有名的，其中有一張是光速非常緩慢的街上風景。

由於在那裏光速的界限極爲淺近，只要騎自行車行走，就可能顯示出相對論的效果。在這個奇異國家的風景中，有一幅是看起來被壓平的騎脚踏車者的姿態，像這種相對性理論解說書的其他圖片也很多，但是由於“湯姆金斯系列”最有名，因此在探討勞倫茨短縮的不可見性的論文中特別被舉爲攻擊的對象。

亦即這張圖片是錯誤的，的確可以這麼說。因爲以上說明過，眼睛所看到的形象，不是勞倫茨短縮的姿態，而是或伸或縮、歪斜以及迴轉等，很難表現的形狀。

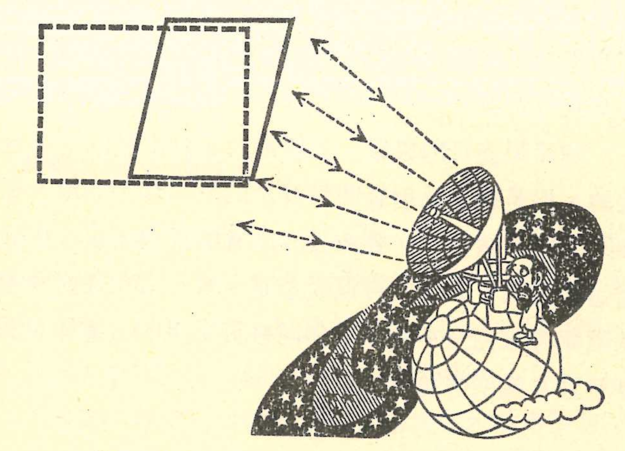
例如自行車的車輪以及騎自行車者的頭部，不是圖片左側的形狀，應該是變成右側的形狀。駕駛跑車疾駛的年青人的面孔，乍看之下應該是扭向一邊的（奇異國家的警察並不是那麼好當）。

但是由於並沒有犯了學問上的錯誤，我認爲沒有必



第27圖　人的頭和車輪的勞倫茨短縮和攝影機所拍（？）的形態

要那麼大聲疾呼地批評愛因斯坦沒有發覺，或許格莫的書是錯誤的——。研究這個事實的人大概是因爲這張新奇的圖形而過份地激動，再三強調湯姆金斯的圖片必須加以修正。



第28圖　經由雷達的觀測，其結果又是如何？

關於這個問題並沒有什麼值得爭論的，但喬治·格莫發表了一篇辯解的論文，那是一九六一年的事。

格莫認爲，關於這個議論是因爲大家假定從物體發射出來的光線有一定的光源，如果假定更改，其結果必然會有很大的變化。亦即本章所詳細說明的各種變形，是假定在別的地方有一定的光源照射飛行物體（例如附

近星球的光），或飛行物體本身會發光，必須在這兩種前提下。如果以其他方法照射光線，應當可以得到不同的結果。

格莫說明在其他情況下，例如利用閃光灯拍攝照片和經由雷達觀測，都有可能觀測到勞倫茨短縮。圖形奇妙的歪斜和光的速度的有限性有關係，因此格莫這個辯解是具有意義的。

利用閃光灯的攝影，光線從閃光灯出發的時間是一定的，但是經過反射後回到鏡片的時間却不一樣，在這個時間內開放快門，膠布吸收所有的反射光線，但經由雷達的觀測，其方式可以說也是一樣。這和從前所考慮的觀測方法完全不一樣；如同格莫所說的，這種說法的確較容易證明勞倫茨短縮現象。

三、時間停滯之謎

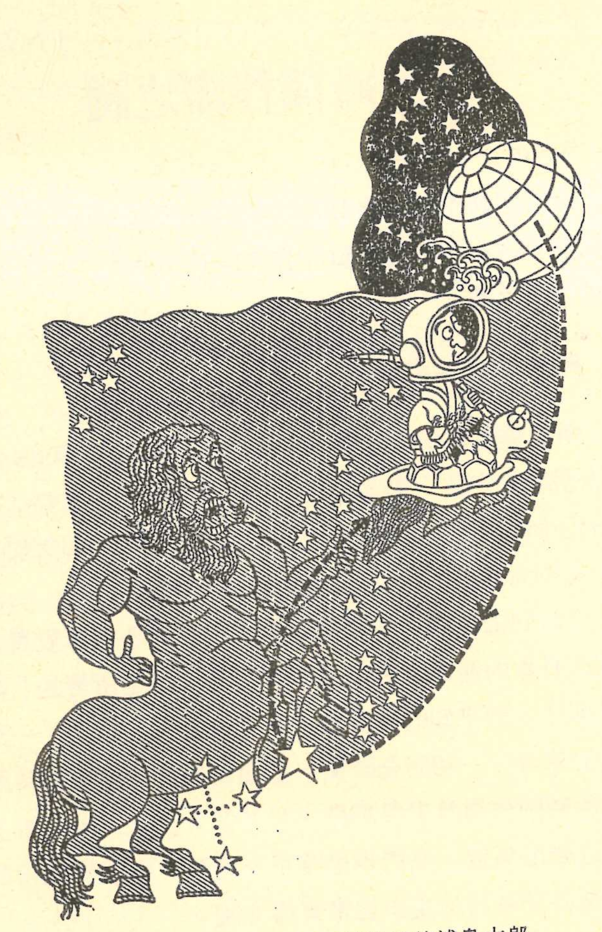
從此以後空間本身以及時間本身將消失於黑影之中，但是也唯有兩者的某種結合才能夠保持獨立的存在。（閔可夫斯基）

時間的延遲和停滯

從這章開始稍微改變一下話題，談一談地球上一位漂亮的女孩子爲了等待太空人而變成老太婆的故事，亦即科幻小說所經常描寫，以及在相對性理論的研究歷史上具有重大意義的“時間的停滯”的問題。

“時間的停滯”這種問題經常出現在各種傳說裏面，例如日本的浦島太郎以及李普、凡・溫克所著的「幽靈新郎」。到末知的世界去，回來後故鄉已經過了一段長久的歲月，一切完全改變，這種傳說和太空旅行時所出現的時間停滯效果很相似，另外像天上三天等於地上三年之類的傳說，我們也經常可以聽到，科幻小說迷對於這種時間停滯的現象經常覺得有趣。

科幻小說中出現的時間停滯效果，可以舉出很多的例子，將主角送上太空船進行太空旅遊，只要不假定超



第29圖　從太空旅行回到地球的浦島太郎

科學的太空船的推進法，這種效果必定會出現。

這種流行的「時間停滯」問題，曾經受到不少人的反駁，我想大家都知道，其原因決不只是時間停滯的現象極爲不可思議而已。

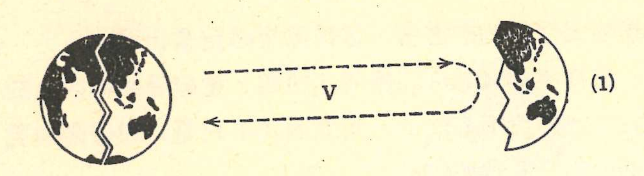
如果相信勞倫茨的變換式，那麼也應該坦白承認，和勞倫茨一費茲介路的短縮公式 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ 以完全相同的比例運動的太空船的時鐘（亦即時間），會有停滯的現象。

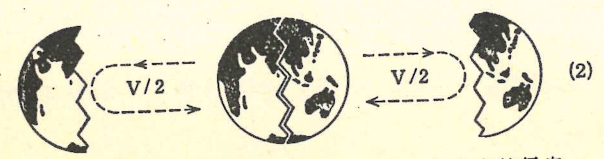
從地球出發到怪馬星座阿爾發星，以光速百分之九十的速度返回時，地球時間和船內時間的比例約爲百分之四十，達到光速百分之九十五時，則比例爲百分之三十，地球上的十年在太空船裏只不過是三～四年。

這是一個不可思議的事實，而在我們拋棄絕對時間的概念時，我們必須承認這種現象的存在。但是問題是在特殊相對性理論裏，如前所述物理法則並不是根據座標系，而是以相對性的原理爲出發點，因此才稱爲相對性理論，將這種相對性的想法應用於太空旅行，時間停滯這種矛盾的問題也就出現了。

從地球看太空船在運動，在相對上和從太空船上看地球運動是相等的。

因此，以太空船爲基準來考慮的話，可以成爲地球





第30圖　即使進行這種平等的（！）太空旅行自然會發生年齡上的悲劇嗎？

時間緩慢的理由。經由觀測系得到不同的結論，在相對性理論上並不是一件奇怪的事情，但是關於這種時間停滯的相對性，在旅行完畢後，是可以比較雙方的年齡，但卻不能因爲觀測方法不一樣而下定論。

留在地球上的人，即使自己增加了十歲，仍然會認爲太空船的飛行員只增加三歲，一邊以羨慕的心情來迎接太空船的歸來。另一方面太空船的人如果以太空船爲基準，則地球在運動，當他們和地球上的人再會時，一定會認爲他們比地球上的人老了很多。

這兩種期待不可能都是正確的，再會的人們不可能彼此主張對方比自己年輕，答案一定是那一方有錯誤，

或是雙方都錯誤，再也沒有比這種時間停滯現象更令愛好相對性理論或幻想太空旅行的人煩惱的了。

這是一個越想頭腦越混亂的問題，在左思右想之後，有人抱著不管怎樣都行，有的放棄考慮，也有人會認爲愛因斯坦不一定就是正確的，反正碰過這種經驗的人應該不少。

其實學者當中仍然有人主張沒有時間停滯現象，認爲愛因斯坦是錯誤的，其代表者爲英國的物理學家迪思格爾。迪思格爾的反論即使在愛因斯坦逝世後，仍然重複刊登在物理學術雜誌上（英國人相當頑固……）。

雖然現在已經再也沒有那麼多人反對愛因斯坦，但不久以前仍然是很多的，甚至於以實驗愛因斯坦的理論基礎而成名的邁克爾生也持反對意見，有名的哲學家柏格森也加以反駁，使愛因斯坦非常難過。因此，即使我們有時候對愛因斯坦的理論抱著懷疑的態度，決不是一件可恥的事。

總之，下面我們所要進行的就是解開相對性理論最大的矛盾——時間停滯。

將地球分割爲兩部如第30圖　，這樣的說明或許可以更容易地想出矛盾的原因。

太空船和地球在運動上確實是相對的，但是大小卻完全不一樣，地球要大的多，有人認爲這種大地球的重

力即是時間停滯的原因。

但是這種說明可以知道是不妥當的，如第30圖地球分成兩部份，即使其中一方進行太空旅行，在相對理論上仍然會出現時間停滯現象。第30圖(1)和(2)從相對性的觀點看來，好像是完全相同的現象，但是根據愛因斯坦的理論，則能產生不同的結果。

從下一節開始，我們一邊假想怪馬星座阿爾發星的旅行，一邊慢慢地考慮這些問題。

外星船接近！

美國科幻小說界的優秀作家馬雷·萊茵斯塔寫了一本很有趣的書（最初的接觸）。

遠方的霧中有一顆小點，漆黑的表面並不像藍娃澎號那麼光滑，形狀像圓圓的梨，兩艘太空船之間的迷漫的黑霧，使細部的觀察成爲不可能，但那很明顯的不是天然的東西，守著距離表示器的湯米·杜德靜靜地說：

「正以很快的加速度接近中，好像和我們一樣不讓對方返航，他們會和我們通信嗎？或者等進入近距離內再向我們攻擊呢？」

地球的太空船藍娃澎號在星雲裏面描寫當時遭遇外星船的情形。和這本（最初的接觸）並駕齊驅的是蘇俄的科幻小說家伊旺·耶夫雷摩夫的（飛翔宇宙的太空船

）。

突然事情發生了。雷達的銀幕上出現一點亮光，開始搖動，震耳欲聾的信號聲響起，他們摒住了氣息。

艾隆很快地命令大家進入警戒位置，姆特·安克趕緊回到控制室，再度站在計器板的前面。漆黑的雷達鏡面有了顯示，在深深的湖底，有一顆輪廓清晰，圓潤而發出微光的球體漂浮著……。

鐵爾號照原定計劃前進，光點現在浮現在右手下方的角落，事先的推理使姆特·安克不安、艾隆咬住嘴唇，拉姆緊緊地抓住計器板。鐵爾號向前面遠方發射出同樣強度的雷達電波，來路不明的東西正向這邊飛過來！

和剛才一樣，地球太空船鐵爾號剛開始要和外星人的太空船通信前，描寫極爲生動的場面。

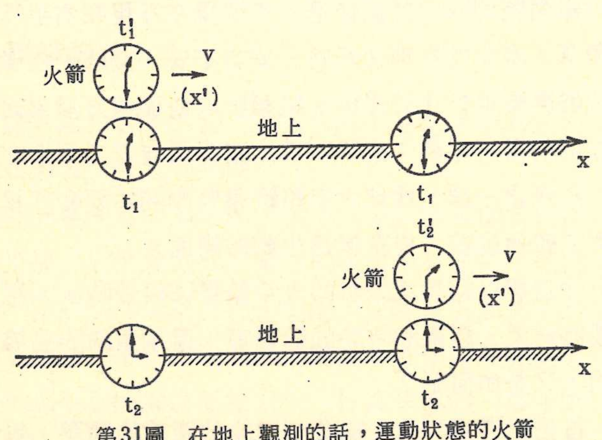
像這樣以超高速飛行的太空船雙方接近時，其現象、觀測結果、距離和時間的關係等，用相對論的立場來說明，又是如何呢？

首先要考慮到的是關於相對論的距離的問題。第十一章說過，當飛行員站在太空船船橋觀望宇宙時，他們所獲得的印象在空間上是前方收縮後方擴大，而且這不單是感覺上的問題，也具有物理上的意義，這種短縮、伸張及時間停滯效果有密切的關係，本來想在這裏詳細加以說明，但是依順序我們還是首先在特殊相對性理論

上，關於長度的收縮和時間停滯的現象加以說明。

運動的時鐘停滯

我們已經在“勞倫茨一費茲介路短縮”的物理意義方面，以時鐘和尺寸詳細檢討過，同時關於其實際的應用和界限，也舉出幾個實例加以討論過，歸納起來，應該可以這麼說。



第31圖　在地上觀測的話，運動狀態的火箭裏的時鐘遲延

愛因斯坦從十九世紀末到二十世紀初，爲了一舉解決理論和實驗之間難於抉擇的問題，舉出了兩種原理。

Ⅰ 物理法則不是根據座標系的相對性的原理。

Ⅱ 光速和光源的運動沒有關係著光速不變的原理。

從這兩個原理出發，將彼此互相以一定速度相對運動的座標系之間所成立的空間和時間的關係，加以整理得到勞倫茨轉換式。

他將勞倫茨轉換式應用於長度的測量，測量時尺寸的兩端必須同時的條件下，導出“勞倫茨一費茲介路短縮”的公式，當然這個時候關於兩端同時測定的同時性問題是嚴密而小心定義的。

運動時鐘的停滯（時間停滯的問題）也完全用這種方法引導出來。同樣地，從基本的勞倫茨轉換公式開始，將一定的時間改成放置時鐘的地點代入公式，自然地得到的不是長度的變化，而是運動狀態的時鐘所記錄的時間比靜止狀態的時鐘所記錄的時間少，會發生“時間停滯”的結果，其停滯的比例和勞倫茨短縮一樣爲

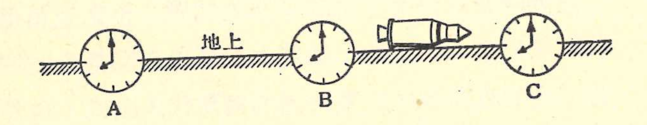
爲 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ ，這是大家都知道的。

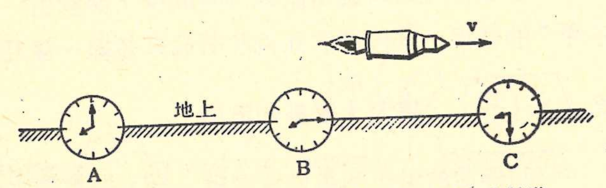
時間停滯的現象和勞倫茨短縮一樣，以直觀去理解是非常困難的。時間行走的現象，我們以第31圖簡單地表示。

地上並列著幾個時鐘，而這些時鐘在相對論的意義上假定都對準，而在上面假定載著一個時鐘的火箭正以準光速飛行。

第31圖上面左邊的時鐘和火箭所載的左邊的時鐘在

同一位置，且雙方對準時間。火箭以速度 v 飛行，不久達到右邊的時鐘的位置。於是比較雙方的時刻，以剛才的公式比例，火箭內部的時鐘發生停滯，這就是時間停滯的現象。這裏我們要注意整個狀況，火箭上的鐘是跟著火箭，亦即固定在運動的座標系上的一個鐘，另外地，從地上的人看，亦即靜止座標上的兩個地點的兩個鐘是指著同一時刻的。





第32圖　從運動狀態的火箭看地球，即使是對準的時鐘，因地點不同而表示不同的時刻。

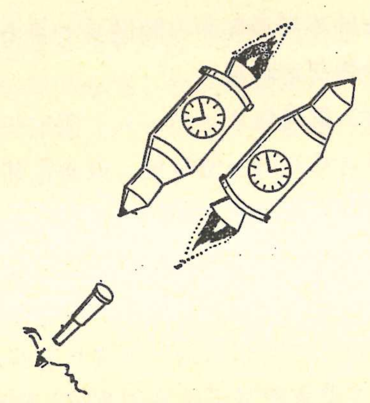
這是和勞倫茨一費兹介路短縮相對的“時間停滯”的現象，是愛因斯坦打破絕對時間這種固定觀念的明顯證明，也是一種自然的基本性質。另一個和時間的停滯有關連的有趣問題，在考慮太空旅行時重要的會發生的

問題，是由於不同地點而有時間差的現象，請看 32 圖下面所排列的三個時鐘。

地上有三個時鐘A、B、C，假定任何一個時鐘從地上靜止者看都在同一個時刻。但是從朝向右方以接近光速 v 飛行的火箭的窗口眺望時（實際上必須以正確的方法做物理的測定），可以知道隨著火箭的向前，前端時鐘所指的時刻向前走，這用直覺很難理解，但是只要再回想到同時性的概念的話，其實並沒有什麼不可思議。

在地上從B點所發出的光的信號，完全在同樣的時刻到達時鐘A以及C。但是這種信號的交換從運動中的火箭眺望時，如果光的速度和靜止系所看到的一樣是 $c(=3\times10^8\,\mathrm{m/sec})$ 則A和C的位置會有變化。由於光的速度不變，在地上觀測到同樣的時刻，從火箭上看則不是同樣的時刻，光到達A和C的時間看起來也不一樣。於是地上對準的時鐘在火箭上則不是對準的，這是應用光速度不變的原理，以拋棄絕對時間的概念的相對性理論典型的適用例子。當然著眼於某一點的時鐘（譬如A則爲A），以適合於理論的方法觀測的話，任何一方都是以 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$ 的比例出現停滯現象。

另外爲了不使大家誤解，我們必須再度聲明，以相對性理論爲對象的事象，都是在某個時刻發生於空間的



第33圖 和勞倫茨轉換不同，逐漸接近的時鐘快速移動，逐漸遠離的時鐘緩慢移動。

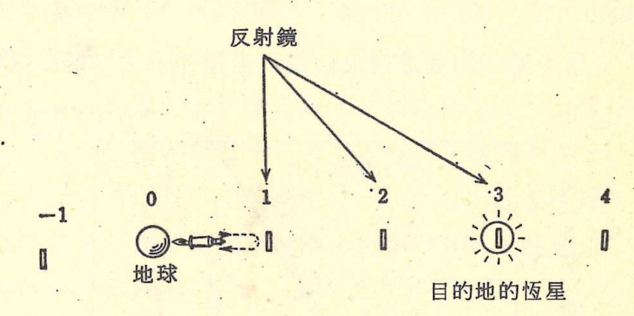
某一點。由於座標系改變，在同一時刻同一地點上有那種事象，關於這個事象是不會有變化的，而變化的只不過是對於一種事象的測定值之間的關係而已。

另外還有一種更容易誤解的現象，那就是以眼睛眺望時，除了勞倫茨轉換所引起的時間停滯外，接近的時鐘移動很快，遠離的時鐘看起來移動比較緩慢。由於這種變化非常大，以望遠鏡等眺望火箭內的時鐘時，其移動一點也不像勞倫茨轉換式。這種情形和前面所講的天球或太空船的形態由於勞倫茨一費茲介路短縮現象而千奇百怪，是很相似的，因此座標變換這種純理論的紙上作業和現實的觀望很難一致。

時間和空間的伸縮

再來我們將討論從太空船的船橋觀望宇宙時，關於空間的伸縮的一些問題。以物理說明視線方向、距離的伸縮，最容易了解的方法是具體地想像太空船的距離的測定。

如第34圖所示， 我們假定巨大的反射鏡排列在地球以及目的地（譬如怪馬星座阿爾發星）的連結線上，每隔一光年的距離一個反射鏡，同時假定太空船沿著這條直線以光速的百分之六十航行。



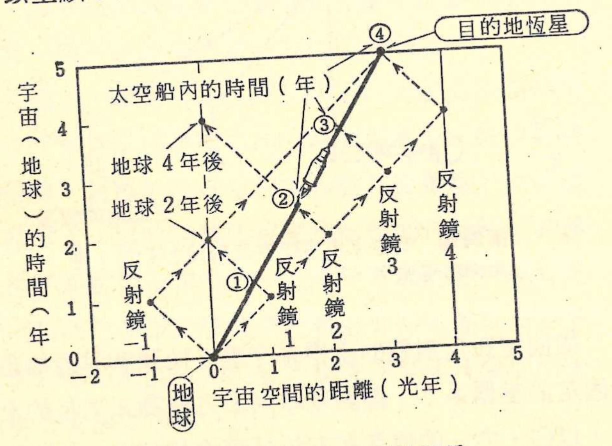
第34圖 假定宇宙空間有反射鏡並列著，則比較容易思考

從固定在反射鏡的座標系來看（地球和目的地也都是固定的座標系），離開地球向右方移動三光年的太空船，以〇・六c的速度在五年後到達目的地。由於太空

旅行上時間的經過是重要的因素，在一次元的反射鏡的排列上附加時間，以這個爲縱軸描繪出圖表如第 35 圖。縱軸表示宇宙空間各點的經過時間（當然使用對準的時鐘）。

這麼一來，航行三光年的太空船的軌跡，我們以斜粗線來表示（反射鏡及地球的位置並沒有移動，爲垂直線）。粗線上的事象爲從船上的同一地點（即船內）觀測到的，時間並不一樣，其時間以 $\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}=0.8$ 的比率移動，成爲圓圈內的數字，亦即移動三光年却記錄四年。

以上顯示出地球或反射鏡的坐標系和太空船的座標



第35圖　空間的伸縮和時間的關係

系在時間和空間的關係。

這裏我們假定在出發前，太空船在離開地球的瞬間前後拍出雷射電波。電波當然以光速（一年一光年）前進，圖中以四十五度傾斜的點線表示。對在地球的人來說，這種雷射電波以反射鏡 1 和 − 1 反射回到地球時是在兩年以後，從這裏地球基地的觀測者可以知道，反射鏡雙方都是間隔一光年。

但是對在太空船裏面的人來說，從反射鏡 − 1 反射回來的雷射電波，如圖所示要在船內時間四年後，才可由反射鏡 4 反射到的電波在目的地一起觀測到。因此，太空船的觀測者在②的時間時，剛好在各距離 − 1 和 4 兩光年的地方。

其次並列於太空船行進方向的反射鏡 1、2、3 等所反射的電波在船內觀測時，其接收信號間隔爲一年，可以推論反射鏡以每半光年距離排列，同時由於從後部反射出來的反射電波每經過四年才到來，可以知道是以二光年的間隔排列。

亦即比起靜止時的觀測者，可以觀測其空間密度前方爲二倍，後方爲二分之一，這就是第一章所說明的數值，具體說明了宇宙空間在太空船的前方收縮、後方擴大。

或許稍微有點難以理解，但是像以上的圖形說明，

在了解相對性理論上非常重要，請再仔細考慮一下。如果將這些僅用數式表示，則可能更加麻煩。

太空船的時間和地球的時間

「在一百二十七年前，當時我三十歲，是太空探測隊的駕駛員，飛往二十三光年的星球。往返飛行在地球時間需要一百二十七年，太空船的時間需要十年，是在四天前才回來的………我的太空船普落米休士早留在月球，今天才從那裏飛回來」。

她瞪著我一句話都不說，輕動嘴唇，一旦想啓開又閉了起來。隱藏在她的眼睛裏面的到底是什麼呢？驚嚇？感嘆？還是恐怖呢？

「爲什麼不說話？」我問。

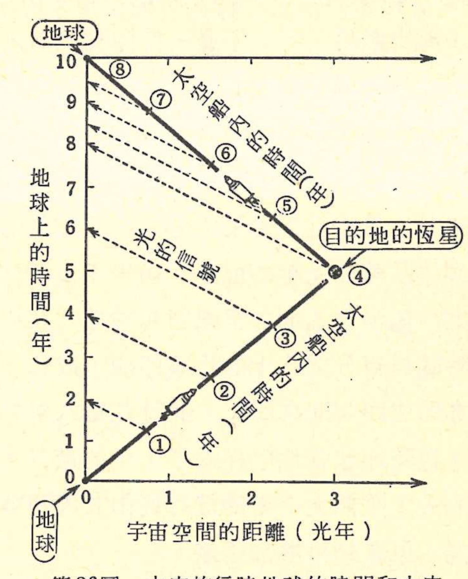
「我實際上已經幾歲了？」

我勉強地笑了出來，但並不是親切的微笑。

「妳所說的實際年齡是指什麼？如果是生物學上的年齡則應該是四十，以地球的時鐘計算則已經是一百五十七歲了……」

以上是波蘭名科幻小說家斯塔尼史拉夫·雷姆的（從星球歸來）裏面的一節。描寫完成恒星旅行後，太空船內的時間和地球上所經過的時間的差別的科幻小說相當多，雖然這並不是書本上主要的內容，但有很多是將

它列爲故事的小插曲，前面的（飛翔宇宙的太空船）裏也有這麼一段插曲。



第36圖　太空旅行時地球的時間和太空
內的時間的關係

「鐵爾號完成前，普通的火箭船上馳奔向佛馬爾浩特、牧羊、亞克特爾斯等星球。已經過了五十年，佛馬爾浩特隊將在兩年後回到地球，亞克特爾斯隊和牧羊隊則將於四十年到五十年後回到地球……在我們進行飛行的時候，人類或許更能夠完全地克服時間和空間的問題

，新的太空船將飛的比我們更遠，我們所獲得的情報，已經沒有用了……」

這種“時間停滯”可經由固定於地球的座標系來加以考察，導出數值，已經不是一件困難的事。以相等速度航行時，只要擴大前述的圖解，加畫回到地球的歸路，如同第 36 圖所畫的粗線“＞”就可以了。

由於從地球出發的太空船之速度爲0.6 c ，所以能在地球時間（目的地的恒星或途中的反射鏡的時間）五年後，到達距離三光年的恒星。如果不去考慮停留的時間，則太空船沿著上面的粗線回到地球，在船內所測定的經過時間以百分之八十的比率停滯，成爲○中所寫的數值，亦即去四年回來四年，共計花費八年的時間才回到地球。這時地球當然已經過了十年的歲月，但是比起地球上的人，雖然太空船的飛行員由於肉體或精神疲勞引起衰老，但是却可增加兩歲。

當太空船返回地球時，在太空船內的時間每一年發出光的信號，其光的軌跡如36圖左上方以點線來表示。即去的時候四年之間所發出的光信號，地球每兩年收一次共需八年，回來的時候四年之間所發出的信號，地球每半年收一次共需花兩年。這種有趣的結果，和剛才所說的接近時，時鐘移動很快，遠離時，時鐘移動較慢的現象一樣。

“時間停滯”的結果，我們已經用圖解清楚地表示出來，這裏所描繪的圖形就稱爲“閔可夫斯基圖表”。

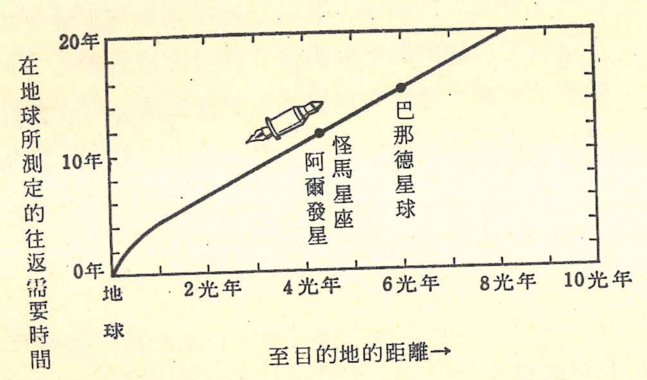
閔可夫斯基在愛因斯坦發表相對性理論後，立刻以（空間的時間）爲題進行演講，他認爲愛因斯坦的理論是以包含時間的四次元幾何學巧妙地表現出來。閔可夫斯基這種時空（包含時間的空間）裏面表示太空船或光的線，就稱爲世界線。

閔可夫斯基型時空後來直到愛因斯坦的第二理論“一般相對性理論”出現後，才被有名的非歐基里德的黎曼空間的幾何學所統一，不過在這裏我們將講解閔可夫斯基型時空最簡單的情況，以橫軸來表示距離，縱軸來表示時間，只要觀察這個圖形就夠了。

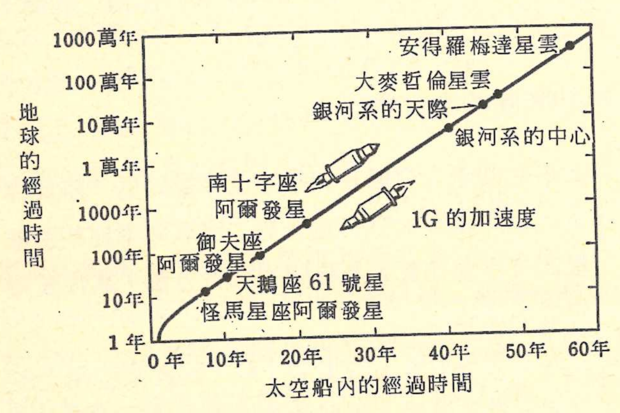
節約時間的太空旅行法

以上所說的是太空船在相等速度運動時的“時間停滯”現象，但是如果太空船燃料夠，塔載效率好的引擎的話，應該有不會花費太多時間的航行方法，其代表爲經常一定的加速航行法。

由於人類習慣地球上的重力１G，因此太空船也經常以１G的力量加速度，等到達航程中央時，船頭一下子回轉過來，以１G減速行進。這樣的話到達目的地時，剛好速度等於零，能夠完全降落或停泊。



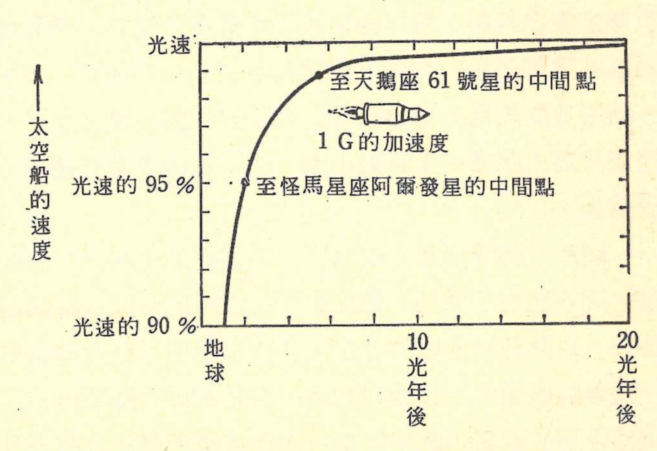
第37圖　以1 G的加速度往返時在地球所測的的需要時間。距離超過 10 光年時 則以光速前進



第38圖　以1 G的加速度往返星球的世界時太空船內和地球時間經過的差

關於用這種航行法的時間問題，由於具有加速度，而特殊相對性理論只在一定速度下才能夠計算，所以或許各位會認爲必須應用一般相對性理論。但是即使是加速度，每個瞬間都可視爲一定的速度，因此只要一個個加起來也可以得到答案的。這種方法譬如說假設平緩的斜面爲樓梯，樓梯的每一層都可以應用特殊相對性理論，亦即勞倫茨轉換。

因此請看下面的三個圖形。第 37 圖爲以 1 G的加速度往返距離數光年的星球時，在地球所測出的需要時間，可以知道怪馬星座阿爾發星需要大約十二年。更遠（二十光年以上）的星球雖然圖上沒有顯示出來，但如



第39圖　以1 G的加速度前進時距離和速度的關係

果以光速飛行，計算上應該不會有很大的差別。

最大的問題是太空船內的經過時間和地球的經過時間兩者的關係，我們以第 38 圖來表示。飛到越遠的地方時間的差別也越大，但這是由於距離越遠，太空船的速度越接近光速。

即使往返仙女座星雲，在船內只要六十年，亦即約爲一個人一生的時間就可達到，當然地球已經過了數百萬年。

第 39 圖爲太空船以 1 G的經常加速法航行時，太空船的速度曲線。用這種航行方法，在地球和目的地的中間速度剛好可以達到最高，因此到星座的一半距離以橫軸來表示其值，可以知道旅行中最高的速度。例如怪馬星座阿爾發星和地球的中間點爲二・一六光年，到那一點的速度約爲光速的百分之九十五，如果讀者想以太空旅行爲主題寫一本科幻小說，從這些圖表當可獲得不少助益。

關於“時間停滯”的問題，從這些圖表我們可以知道，到特定的目的地（恒星系）所需要的時間或時間的差別，以及計算速度的方法。同時也說明了在特殊相對性理論的範圍內可以找到答案，但是關於“時間停滯”這種矛盾的說明仍然不完全，因爲這裏所舉出的圖表只不過是從地球或目的地，以及雙方所固定的宇宙空間（

座標系）所看到的，而不是從太空船上所描繪的圖表。

那麼對於太空船的觀察者（飛行員）來說，“時間停滯”應該如何說明呢？如果就照著相對性的原理去說明，則地球取代太空船，所描寫的圖解顯示地球方面時間經過較少，還是無法清楚地說明這種矛盾的現象，下一章我們就針對這個問題來討論。

四、四次元的世界和重力

我不知道重力的原因（牛頓）。

從特殊相對性理論到一般相對性理論

愛因斯坦一生的努力都是在使所有分離的東西統一，分散的東西集中，同時將隱藏於複雜的外觀透明來探討純粹的一般法則。

這種傾向與其說是意志或是思想，不如說是愛因斯坦本身所說的「天性就是如此」。晚年愛因斯坦在量子力學的思想方面，和尼爾斯、波爾等多位著名的物理學家展開辯論，並且遭到批評。

關於愛因斯坦的量子力學的見解，最後終於不被視爲正統而不予以接受，這個事件對愛因斯坦來說可以說是命中註定的，因爲潛伏於量子力學根底的一種“曖昧的思想”並不適於這位偉大的學家的天生性質。下面這段小插曲正可以表示出愛因斯坦的天性。

愛因斯坦在對人處世方面很隨便是有名的，即使在日常生活的表現也是一樣，刮鬍子用的肥皂和洗衣服用的是同一塊，別人勸他的時候，聽說這位天才回答：「

用兩個肥皂對我來說相當複雜」。

愛因斯坦終生希望人類能夠和平，情願處在完美的孤寂之中，繼續探討有關萬象統一的問題。

對愛因斯坦來說，我們剛才所說的特殊相對性理論，雖然在時間和空間的結合上獲得成功，但是其理論還是不完全的，因爲特殊相對論雖然對於電磁場有效，但是對於重力場却無效，而且即使在相等速度運動上可以應用，但是却不能處理因加速度所產生的力量。

用科幻小說的立場來說，亦即不能嚴密處理飛過極重的星球旁邊的太空船，以及環繞銀河一圈的太空船所發生的問題。對於重力場，特殊相對性理論無能爲力，是由於重力這種東西本質上和時間或空間是有關連的（對於電磁場不會產生這種問題，那是由於特殊相對性理論就是以電磁波，亦即光爲基本而創立的）。

對於具有加速度的運動，特殊相對性理論無法給予嚴密的解答，當然是因爲特殊相對性理論的基礎，僅適於等速度運動的座標系上的變換。

爲了去除這兩個缺點以彌補理論的不足，愛因斯坦發揮他的天才，完成了其他人都沒有料想到的新體系“一般相對性理論”，時間在一九一一年至一九一六年。

在特殊相對性理論上，加速度和重力是個別的東西，亦即兩種不同的肥皀，但是基於愛因斯坦的天性，這

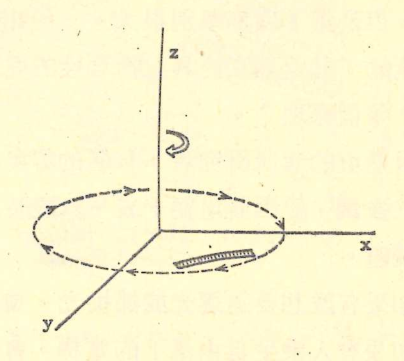
兩個被一般相對性理論統一爲唯一的一個肥皀。

重力和加速度的等價性

一般相對性理論的內容，不管在物理學上或數學上，坦白說都是很難理解的。特殊相對性理論已經是很難了，更何況具有高度理論的一般相對性理論，如果要以入門書來加以解說，事實上辦不到，而且如同解釋煩雜的教科書一樣，沒有什麼多大的意義。

而且筆者本身也沒有能力提出這些光線彎曲和時間停滯等問題的解答，因此可能會使問題更趨於複雜。

所以在這裏，我們將對照特殊相對性理論和牛頓的力學，儘量簡單地說明一般相對性理論的基本概念，請



第40圖　特殊相對性理論不可能解開廻轉物體的問題

暫時忍耐地跟著讀下去。

一般相對性理論和特殊相對性理論一樣，也是基於兩個重大的要求，特殊相對性理論的二項基礎如下：

Ⅰ. 物理定律在所有等速度運動的座標系看來皆具有同樣的形式（相對性的原理）。

Ⅱ. 光速和光源的運動沒有關係（光速不變的原理）

而一般相對性理論則以下列二項爲指導原理。

Ⅰ. 物理法則不管對任何座標系都具有相同的形式（一般相對性原理）

Ⅱ. 成爲加速度運動的原因的力和重力，對於所有的物理現象給予同樣的影響（等價原理）

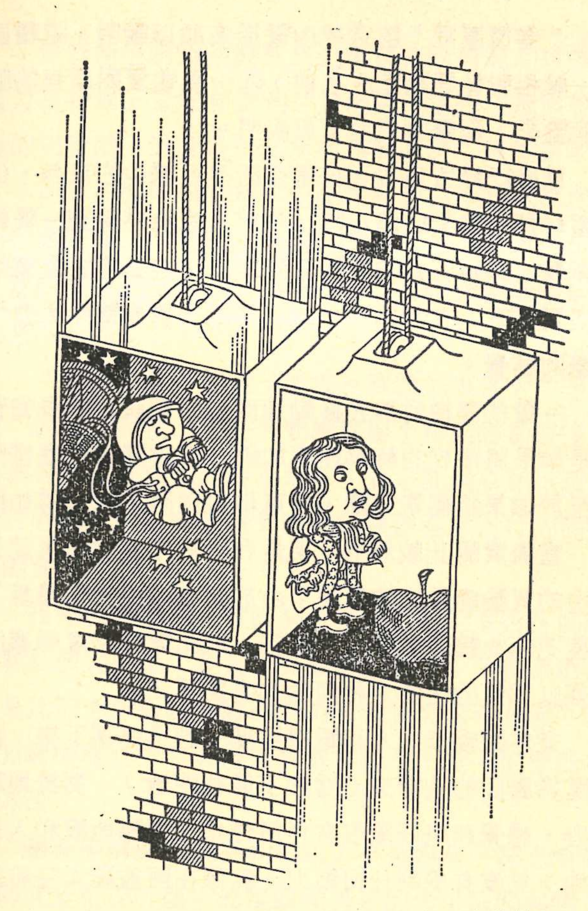
第Ⅰ項爲特殊相對性理論的擴充，從字面上應該可以了解，但是第Ⅱ項則差別很大。一般相對性理論並不是數學性的，其重點在於具有物理性的等Ⅱ項，也就是有名的“等價原理”。

愛因斯坦的共同研究者，有名的雷奧波特·因費德曾經再三強調，愛因斯坦從十五、六歲時就一直思考下面兩個問題。

①如果有誰想要追逐光或捕捉光，會變成怎樣呢？

②如果有人乘坐自由落下的電梯，會變成怎樣呢？

由第一個問題產生相對性理論，而第二個問題則爲一般相對性理論的泉源。我們可以在很多的解說書中看



第41圖 經由電梯的移動方式可以產生無重力狀態和增強重力

到，“等價原理”經常經由電梯來加以說明，這種原理在一般相對性理論完成之前，就一直在愛因斯坦的腦筋裏面盤旋，這裏我們將重複說明。

電梯已經成爲現在日常生活不可缺少的東西，但是當電梯開始啓動或停止時，任何人都會感覺到一陣輕微的衝擊。開始啓動時身體感覺變重，停止時感覺變輕。神經質或病人在電梯停止時，甚至於會有飄浮太空中或頭暈的感覺。

一般的電梯當然在移動速度方面都設計的很完善，但是如果將電梯的移動速度加快，又會變成什麼樣呢？甚至於如果將繩索切斷，使電梯自由落下，又將如何？

當場實驗比較危險，但是利用思考實驗，也就是在腦中的實驗應該比較簡單。由於地球的引力物體落下的速度不因物體的重量而有區別，因此電梯和電梯裏面的人都以相同的速度、相同的加速度落下。

從外面看來，人和電梯整個一起迅速落下來，但是在電梯裏面的人看來（當然不能往外看），對於地球的重力，感覺起來好像沒有任何作用，電梯地板和人同樣落地，並沒有受到任何壓力，就像在阿波羅太空船裏面的人一樣。

這種自由落下的電梯內部，外表上和沒有重力的空間出現相同的狀態。

愛因斯坦認爲這種外表上無重力的情況和實際的無重力在物理上並沒有差別，於是將這種想法做爲他的理論的出發點，這就是前面所說的第Ⅱ項“等價原理”。

由於這種等價原理，因此在無重力空間加速度的太空船裏面作用的力量，和重力在本質上可以說是相同的。電梯開始啓動時，感覺身體較重，和因地球而重力增加是相同的。

“等價原理”當然不能違反實驗的事實，“等價原理”的基礎爲重力對任何物體都給予相同的加速度（輕的東西和重的東西同時落地），將這種現象加以證實的最古老的實驗，就是伽利略在比薩斜塔所進行的同時落下的實驗。

後來較具學問的實驗經由艾特貝斯的進行，同時在普林斯頓大學裏，經過了更嚴格的證實，艾特貝斯的方法是比較地球對於物體的引力（和重力質量有關）和地球自轉的離心力（和慣性質量有關），是一種極爲巧妙的方法。

關於等價原理就到此爲止，不過還有一點必須注意，即就是電梯所產生的現象和箱子的大小限制有關，說簡單一點，我們假設有一部和地球同樣大小的超特大電梯，即使將這部電梯往地球拋下，由於地球的重力向地球中心呈放射狀，因此電梯的中心成爲無重力，但是角

落部分却有傾斜的力量在作用。而且電梯的地板和天花板由於和地球距離不同，所以重力也不同，因此重力不可能完全消失。

亦即重力和加速度互相抵消必需在比地球小很多的電梯內才能成立，而決不是無論在任何重力場，經由自由落下都有可能消除重力。

華麗的幾何學殿堂

剛才首先說明了基礎原理Ⅱ，其次我們將說明Ⅰ的“一般相對性的原理“。

從宇宙看來，這種相對性原理只能在等速度運動下才被考慮，亦即沒有絕對的時間和空間，而物理法則只不過是將相對運動擴大至一般的運動。

這種想法是極爲自然的，將原則上只能適用於以等速度一直線經過的太空船的特殊相對性理論，擴大至即使環繞重力星球的四周的太空船也能夠適用。

但是愛因斯坦爲了達到這個簡單的目的，所需要的方法却極爲難以理解，如果不是喜好數學的人，看起來是要比Ⅱ的等價原理更難理解的。

所以關於這部分的解說也可能等後面再提出，但是其基本的想法還是可以從側面加以簡單的整理。我們從特殊相對論的數式（法則）出發。

愛因斯坦發現採用四次元黎曼空間（處理一種空間的數學體系）是很恰當的，這又可以說是愛因斯坦的天才表現。黎曼空間用幾何學來說是非歐基里德的，由於它是在於表現彎曲的空間，或許有不少人知道這個名詞。

而且以數學方式處理這種黎曼空間的幾何學的手段，一般稱爲張量解析，因此站在數學的立場來看一般相對性理論，其中心可以說是在於張量解析。

由於張量解析在記號上有煩雜的一面，數學不好的人讀一般相對性理論的教科書，往往被張量解析搞得昏頭轉向，最後感到挫折。所以在這裏並不講解張量解析，但是零階的張量爲一般的純量，一階的張量爲向量，或許只要知道這兩點就可以了。一般相對性理論往往會出現二階或二階以上的張量，但只不過是一般數目的擴大。

那麼應用這種難解的張量解析時，如同特殊相對性理論的法則可以合乎基本原理Ⅰ的要求，亦即可以加以改寫使其合乎一般相對性的原理。

因此，以張量解析爲基礎而創立的黎曼空間，在一般相對性理論的理論體系，可以說是雄偉而華麗的幾何學殿堂，不管是容易或困難，具有這麼華美骨架的理論體系非常少。

然而聰明的讀者對於特殊相對性理論的法則可被改

寫成爲合乎一般相對性的原理這句話，或許會抱著疑問。的確這種能夠改寫的情況，即使在數學上是一種擴大，在物理上却不具有重大的意義。

這種疑問是很中肯的，愛因斯坦的一般相對性理論確實不單是由黎曼空間的數學所構成，必須配合第Ⅱ項的“等價原理”才可以成立。

即使“一般相對性的原理”的數學表現，黎曼幾何學是如何的壯大華麗，單靠這些只不過是一間沒有人住的空建築物，必須等”等價原理”這種生命體住進去之後，殿堂才會蓬畢生輝，才能表示出其存在的價值。

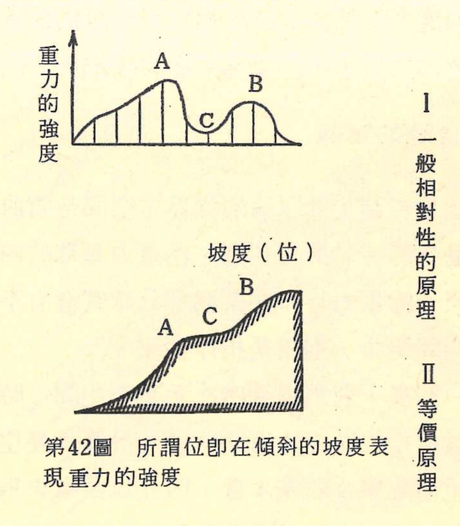
這種幾何學的殿堂和生命的結合，具體上可以用“計量張量意味著位”這句話來表示。

計量張量就是表示四次元黎曼空間（時間當然也是一種次元）的各部位，亦即殿堂的骨格構造、柱子或牆壁裝飾等細部的一種量。同時所謂位，簡單地說就是潛在的性質，將位的大小以斜坡來表示，則坡度大的地方受力大。請看第 42 圖應當可以了解，位的坡度越大則越具有強大的力量。

例如地球的引力，越接近地表則越大，表示這種引力的位坡度在地表附近急速傾斜，在遠方則很平坦。從地球升空的阿波羅太空船反抗這種引力而飛出去，它的位變化就是沿著這條傾斜面的。

因此位就是表示實際上我們所能感覺的力的量，這種量和表示黎曼空間的性質的計量張量結合時，亦即黎曼空間具有物理上的意義。

理解一般相對性理論是很困難的，筆者也汗流夾背地說明到這裏，不知道各位知道了多少？



第42圖　所謂位即在傾斜的坡度表現重力的強度

爲了愼重起見，我們再整理一下，所謂一般相對性理論，即是以Ⅰ一般相對性的原理和Ⅱ等價原理這兩個指導原理爲出發點，首先建立滿足Ⅰ的四次元黎曼空間這種建築物，再擴大特殊相對性理論的法則，然後經由應用等價原理，探討出重力和黎曼空間這種建築物的構

造相結合，從這裏導出各種結果的理論體系。

開始時所希望的導入加速度和重力的作業就此完成，以物理上的引力（位），幾何學上的黎曼空間的特殊構造（計量張量）來統一表現。

當然這種完成的一般相對性理論的方程式，如果沒有重力和加速度，就成爲特殊相對性理論的公式，而且重力和速度如果很小，就成爲牛頓力學的方程式。

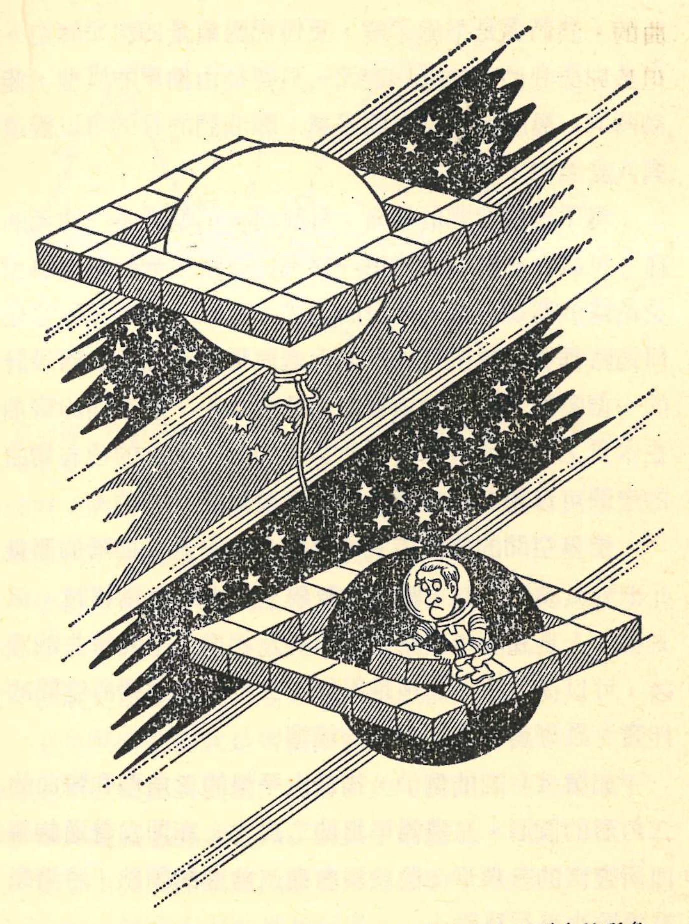
彎曲空間的意義

一般認爲在相對性理論的世界，空間是彎曲的，也是非歐基里德的。如第 43 圖，在重力星球的四周排列幾個一定尺寸的積木時，在某個部分確實會有不合的現象，所謂空間彎曲，到底是指什麼呢？

在前一節裏，我們提到四次元黎曼空間（時間）的計量張量這種令人頭痛的用語，這是計算黎曼空間彎曲的方式（也稱曲率）的基本量，因此以曲率來取代計量張量，或許在稱呼上比較容易了解。

一般相對性理論所討論的四次元時空確實彎曲著，而且其彎曲的方式和重力有關，因此能夠理解彎曲空間的存在，要知道一般相對性理論的內容也就很快了，但是這却不是一件容易的事。

即使一般人認爲我們所住的這種三次元的世界是彎



第43圖　在重力星球四周排積木時會有不合的現象

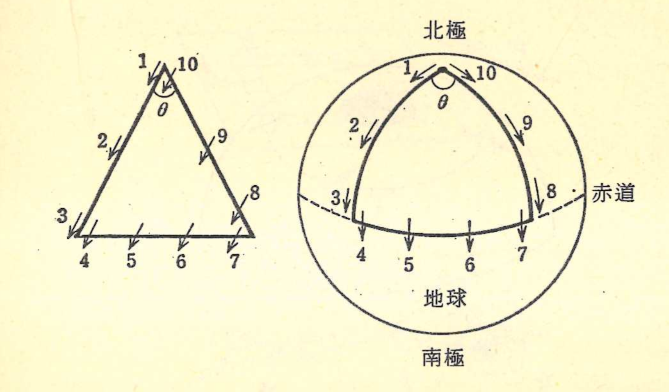
曲的，我們還是不能了解，更何況對象是四次元時空。但是即使我們不知道四次元，只要經由簡單的模型，能夠將其一般的概念記在腦子裏，那我們的目的可以說達到八成左右了。

為了理解空間的彎曲，最簡單的模型就是一次元的線，可以在頭腦中描繪出一條高速公路，無論到那裏都是直線的高速公路，其彎曲方式（曲率）為零，但是任何道路都有轉彎的地方，如何處理彎路是高速公路設計的一個要點，誰都知道彎曲部分的大小，而空間的彎曲在本質上和高速公路的彎曲是相同的，相反的沒有彎曲的空間可以說和沒有彎路的高速公路是一樣的。

黎曼空間的彎曲方式（曲率）本來具有四階的張量九十六種類的成分，雖然在數學上的處理非常複雜，但是根本上是和高速公路的彎曲概念相同。空間彎曲的意義，可以從一次元的類推得知，但是要理解彎曲空間的性質，最好是利用二次元的模型。

如第 44 圖的例子，描繪出平坦的三角形和彎曲的三角形的圖形。左邊為平坦的二次元，亦即在普通的平面所畫出的三角形，假設現在從三角形的頂點，將箭頭沿邊順次平行移動。

從 1 出發降至 2 、 3 、底邊仍然平行移至 4 、 5 、 6 、 7 ，然後 8 、 9 上昇，最後回到原來的位置10。再



第44圖　在歪斜的二次元空間平行移動箭頭時，方向會跟著改變。

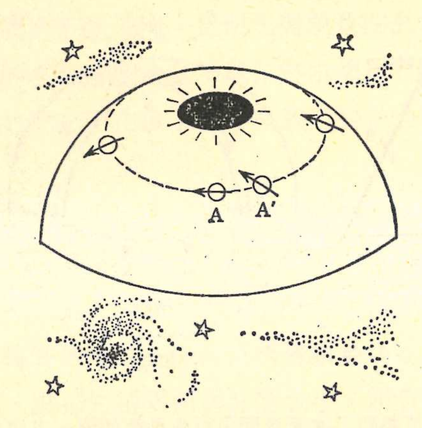
回到原來的地方時比較最初的箭頭 1 和10、其方向當然是一致的，因為是平行移動的關係。

但是在彎曲的二次元裏，其結果是很微妙的，如第 44 圖的右邊，右邊的三角形是畫在地球表面上，或許也可以說是左邊的三角形圓圓地膨脹後的形狀。

這種很明顯的就是彎曲的二次元空間（面），那麼沿著這個在彎曲表面的三角形，如同前面一樣將箭頭平行移動，從圖上應當可以了解其中的道理。

從 1 出發的箭頭雖然繼續平行移動，但是回到 8 、 9 、10時，箭頭的方向就相反了。

如果對於這張圖形還不能夠了解，可以在地球儀上移動大頭針，或是在汽球上用水筆畫上圖畫。甚至於如

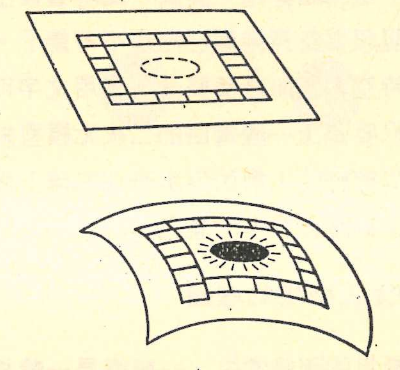


第45圖 在重力星球周圍環繞的人造衛星的方向隨著廻轉而逐漸改變，其理由以膨脹的二次元來考慮則較容易。

果變換三角形，亦即變更箭頭移動的路線，則每次的方向都不一樣，我想這點大家應該知道。

這個事實就是彎曲空間最大的特徵，儘管平行移動，由於移動的路線而方向各有不同——也唯有這種現象，才是非歐基里德彎曲空間的特質。

要在三次元、四次元描繪出平行移動的形像是很困難的，但是只要理解二次元的模型，並不難於了解其中物理的意義。例如環繞重力星球的人造衛星的軸隨著環繞而改變，如第 46 圖一樣，以膨脹的二次元來思考就比較容易理解。


第46圖 在膨脹的二次元上描繪，可以理解空間的歪斜。

同時剛才的積木問題，如果以最後膨脹的二次元的圓形來思考，也應當可以理解（第 46 圖）。首先如上圖，平坦的表面畫上排列的二次元積木，其形狀爲正方形。

其次假想平面的中心放置二次元的重力星球。前面說過重力經由等價原理以空間的彎曲被記述，平面（如 46 圖一樣）膨脹成彎曲（凹進去也一樣）。假設使橡皮的表面膨脹，在腦中想像它的形態，越是中央橡皮越是伸張，平坦時所描繪的每一個正方形，內側的邊成爲伸張而歪斜的形狀。

由於這個圖形已經不是正方形，如果要將它們重新描繪成正方形，則從中心起會有空白，可以說已經不是整齊排列的二次元積木。

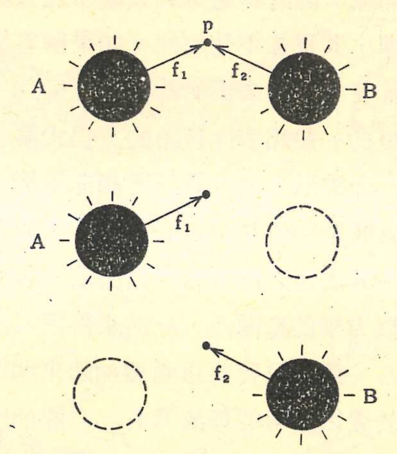
即使從一邊開始排起，排成一圈時會發生參差不齊，就可以發現想要整齊排列已經是不可能了。

四次元時空的彎曲這種概念，光用文字可能不容易理解，但是只要畫上一些彎曲的二次元模型來參考，應該是稍微可以理解的，例如用水筆在汽球上畫一些圖形，然後用眼睛以體會其中的意思。

簡易的愛因斯坦的理論

在愛因斯坦的理論當中，一般認為一般相對性理論比較難於理解，其難解的原因是其根本的想法，包括了我們日常所感覺到的一切，以及其數學上的演算需要高度的技巧。到前一節為止，即使我們承認它很難理解，不過還是將一般相對性理論的基本概念以各種方法表現出來。這一節的主題仍然離不開這個範圍，但內容上則更為普遍，亦即我們將說明使一般相對性理論的價值不減的天體現象及其實驗。

一般的解說書的內容大都從有名的光線彎曲或水星的近日點的移動開始，但是由於本書已經對一般相對性理論的來龍去脈下了一番苦心，所以將直接探討愛因斯坦的理論對於這些有名的現象，實驗的處理情況。這種愛因斯坦的理論當然是一般相對性理論的結論，直截了當地說它是以兩個主要的方程式來表現，其方程式如下。



第47圖　以一般相對性理論很難分開思考星球A、B的影響

①重力場的方程式

②運動的方程式

這兩個方程式看起來絕不複雜，只要將它視為設計圖案，則整行一下子看起來應當是很清晰的數式，而且如果重力或速度非常小，和高中部分所學的牛頓力學的方程式是一致的。實際上前面也說過，愛因斯坦的天性在於注意複雜的外觀中所隱藏的透明的統一性，如果理論的方程式複雜而冗長，則可以說其本身是和理論互相矛盾的。

因此①和②這兩個方程式確實很簡明，不過由於公

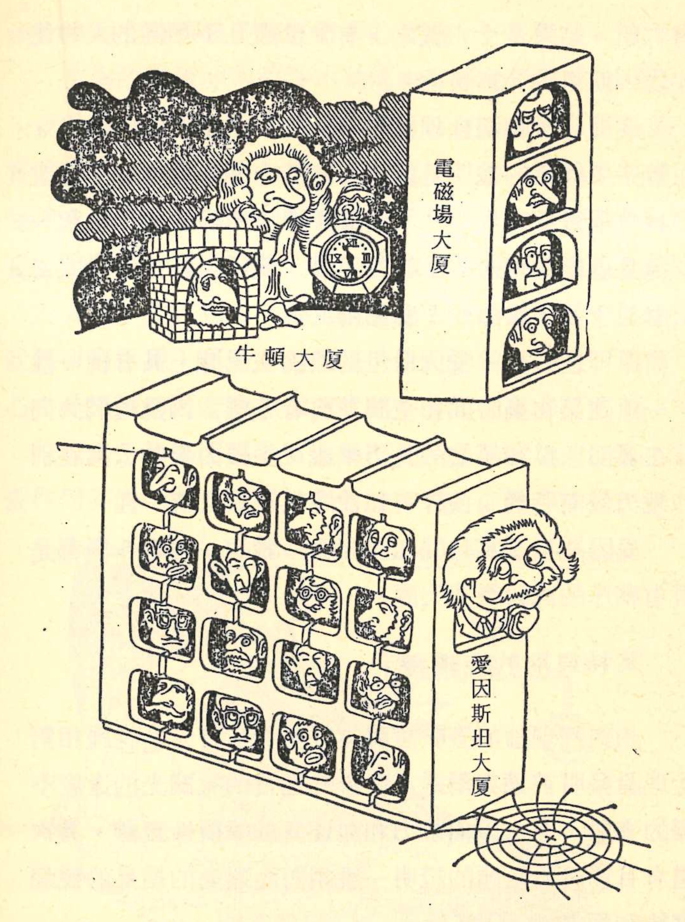
式的形式很簡潔，因此將這個公式應用在實際的問題上應該也很簡單，其實並不是如此，如果解答是那麼簡單的公式，也就沒有特意去說明的必要了。

愛因斯坦的一般相對性理論的方程式第一個困難的地方是具有“非線形”的性質，所謂非線形，也就是即使原因兩倍其結果不成爲兩倍的性質。例如第47圖爲了探討因A、B而運動的行星，則必須求得因A和B的影響，在牛頓力學的範圍內，分別求得因A的力量f_1和因B的力量f_2，然後只要將這兩個加起來問題就可解決了。但是由於愛因斯坦的理論具有非直線的性質，像這樣的分解是很難達成的。

第二個困難的地方，亦即表示時空性質的“位”這種要素的數量，在愛因斯坦的理論裏非常多。

將這種位以居住在公寓內的人爲圖形來表示，左上角爲牛頓力學的公寓，只有一個人住在那裏，房間也只有一個。右上角爲電磁場的公寓，有四個人一起住在那裏，因此較牛頓公寓複雜。

問題在於下面表示愛因斯坦的方程式的公寓，這棟建築物爲四層樓，每一層樓各有四個房間，住在那裏的人全部共有4乘4=16個人。這十六個人的面孔不一定全不一樣，或許有幾組是雙胞胎，例如一樓的三號房間和三樓的一號房間長的一模一樣，而像這樣的雙胞胎共



第48圖　愛因斯坦和牛頓的大厦。每個房間住有名叫“位”的人，牛頓大厦另裝置有時鐘。

有六組，結果是十六減六，有十位面孔不相同的人物住在愛因斯坦的公寓裏面。

亦即一般相對性理論的方程式由這十個位所組成，在數字上嚴格的說，也就是“關於十個未知位的十連立非線形偏微分方程式”。不管數學上如何表現，比起一個數量就能夠解決的牛頓的理論，愛因斯坦的方程式必須處理十個，當然較不容易解。

但即使這樣，愛因斯坦的理論在思想上具有統一性，一棟建築物裏時間和空間並沒有分離，因爲他們共同住在裏面。以建築物的比方來說，牛頓力學的公寓在別的地方裝有時鐘，或許可以說這就是缺乏統一性。

愛因斯坦公寓時間和空間是一體的，內容外觀都是很有秩序的高級豪華大廈。

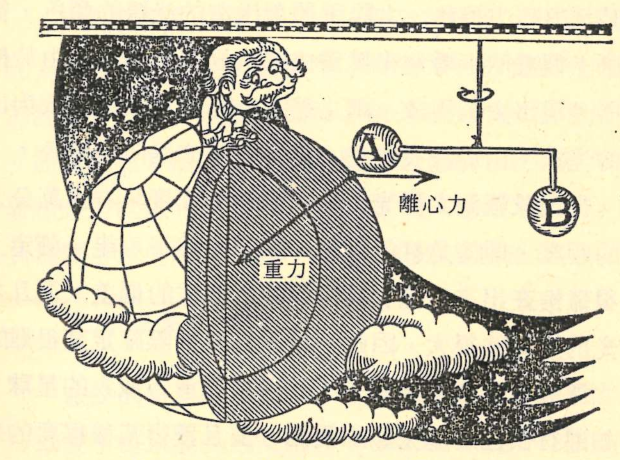
艾特貝斯的旋轉秤

相對性理論的查驗證明有很多種，首先是特殊相對性理論發明前邁克爾遜·摩雷所進行的有關光的速度不變的實驗，還有證明重力和加速度的等價性實驗，其次還有目前成爲話題的證明一般相對性理論的結果的幾個實驗和觀測。

首先談到關於“等價原理”的實驗。前面已經說過，證實等價原理的歷史性實驗，有伽利略的比薩斜塔落地實驗和艾特貝斯使用旋轉秤的實驗。

前者的實驗非常粗糙不夠精密，所以只能略知一二，成爲相對性理論的貴重基礎的，可以說是艾特貝斯的實驗。艾特貝斯使用如第 49 圖的旋轉秤，兩端各掛上物體A和B，精密測定其平衡狀態。在A和B作用的力量，由於秤放在地球的表面。有地球的引力和地球自轉（或公轉）的離心力。經由這些總合的力量，秤在某種狀態會很平穩，但是引力爲基於物質的眞正力量，而離心力是因廻轉而產生以加速度的外表的力量。

因此，如果因爲物質種類不同而重力和加速度的力量作用不同，經由改變A和B的材料，旋轉秤的狀態應



第49圖　利用旋轉秤的艾特貝斯實驗

該會有微妙的不同。

艾特貝斯基於這種想法，精密的實驗等價原理，結果其精密度達到十億分之一，可以證明等價原理是成立的。這個實驗後來經由其他人再度改良，其精確程度確實可以達到百億分之一。

愛因斯坦的出發點等價原理，經由這些實驗的證明而獲得實用上充分的保證。

光線顏色的變化

有名的一般相對性理論的查證當中，可以從自然中觀測，也可以經由地上人爲的實驗獲得可能的現象，那就是重力紅方偏移。太陽所照射出來的光線的顏色，從地球上觀看時，看起來轉變成紅色的現象。這是由於位差所表現出來的現象，總之從遠方眺望重力場所放射出來的光線，由於波長較長，亦即看起來偏向爲紅色。

從地球觀測太陽光，這種偏向的程度只有百萬分之二的程度，即使是紅色偏移，眼睛當然不可能，測定上也很難檢查出來，還有其他因素所造成的偏差，而且本來光的搖晃就很大，因此一般認爲要實際確定是很難的。

那麼不以太陽做例子，改用其他重力較大的星球，例如進行白色矮星光線的觀測，並且獲得某種程度的效果。

紅方偏移這個名稱頗有名，我想知道的讀者應該不少，簡單說明其理由的方法有很多種，由於重力較大的地方時間的經過也較緩慢，從遠方看那邊的亮光，看起來光波振動會較爲緩慢，這個說明是最普通了。

另外的說明，說光是一種粒子，脫離星球重力場時會失去活力，因此振動數變小，這種說明也可以成立，總之這個結果可由一般相對性理論來加以說明。

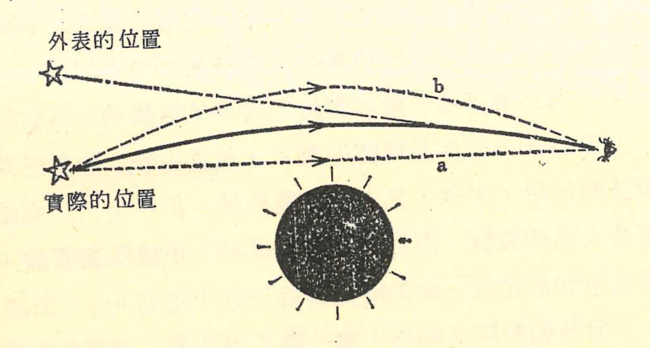
重力紅方偏移最精密的測定，最近由學者梅斯巴瓦所發明使用 γ 射線，其方法極爲巧妙，但不是天然現象而是人爲的實驗，而且已經獲得成功。根據這個實驗，理論值和測定值一致的情況爲百分之十左右。

另外關於紅方偏移，有一點必須注意，那就是所謂紅方偏移是一種從很遠的地方看重力場的光線時所產生的現象，而不是燈光的顏色由於地點的不同而逐漸改變。從重力星球所發射出來的藍色的光線，從遙遠的地方看起來是紅色，那是因爲在距離很遠的地方觀看，如果到那顆星球的旁邊去看，看起來仍然是藍色的。

光線因重力而彎曲

在愛因斯坦的一生當中所發生的最偉大的事情，亦即以愛丁頓爲隊長的英國科學探險隊，利用日蝕成功地觀測到經由太空的星光屈曲的現象。

這個觀測的結果雖然不能說是一般相對性理論證實的最大收穫，但由於是在第一次世界大戰開始後進行的，同時這種現象具有魅力和神秘性，使得愛因斯坦的名聲大噪。



第50圖　經由星球的重力而光線彎曲

因太陽而星球光線彎曲如第 50 圖，光線被太陽存在的一邊，亦即重力較強的一邊所吸引，產生彎曲射出的現象。這種彎曲的方式由於和一般相對性理論的公式所計算出來的大略一致（但是精密度較差），理論的實證上是具有價值的，這種現象在物理的意義上可以配合兩種情況來簡單說明，一爲受到強度的重力，光的速度會有變化的現象，一爲光有選擇以最短的時間達到目的地的路線的自然性質，具體的說明如下。

經過路線 a（點線），光線從星球到達觀測者的眼中，由於路線靠近另一個星球的重力場，時間的進行緩慢，因到達的時間也較長。另外經過路線 b 的時候，距離至星球較遠而時間的進行較快，但是由於繞遠路，仍然必須花很長的時間才能夠到達。

於是兩者的中間，應該有能夠以最短時間到達觀測者的路線，這條眞正的路線我們以實線來表示，像這種光所經過的路線，在物理學上稱爲測地線，簡單地說就是最短距離的線，當然這種情況下的最短距離是在四次元時空內，而不是在三次元空間（亦即三次元的測定線）。

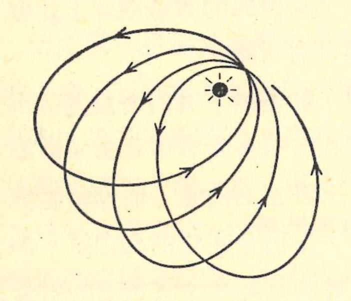
光線在四次元時空以最短距離行進，然而在三次元看起來却不是最短距離，這是在三次元空間內光線彎曲的幾何學上的說明。這種光線彎曲的實驗地球上比較不可能，如果利用天體的話則有可能。

經常進行的實驗當中，就是剛才我們所說過的因太陽而星光的彎曲，直到現在有很多人利用日蝕來觀測，並且得到一·五秒至二·三秒左右的值，而理論值爲一·七五秒可以說符合要求，但仍是概略的測定值。測定值這麼鬆散有各種原因，特別是隔半年所拍攝的兩張天體照片，以高精度來比較是一件很困難的工作。不過比起以牛頓力學來處理光粒子這種想法所出現的值○·八七五秒，可以說是很接近理論值。

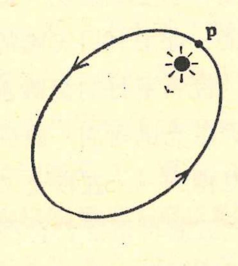
水星的近日點的移動

以上所說的紅方偏移或光線的彎曲，雖然在證明一般相對性理論上是一個有力的查證，但光是這些還不能證明整個一般相對性理論的理論體系，這種見解被認爲頗具有影響力。

因爲重力紅方偏移的說明，只要有等價原理和特殊相對性理論就可進行，而且愛因斯坦本人在樹立一般相對性理論前已經提出答案；另外光線彎曲的公式，也經由史丹福大學的席富博士根據等價原理和特殊相對性理論的勞倫茨短縮，以及時間停滯等想法引導出來。同時剛才說過，理論值和實驗值的一致並不理想，因此在查



愛因斯坦的理論



牛頓的理論

第51圖　經由一般相對性理論說明行星軌道的近日點P的移動

證一般相對性理論上被認爲最主要的是下面將要說明的水星的近日點的移動。

一般環境太陽進行公轉的行星的軌道，根據牛頓力學來計算，如第 51 圖的右邊，爲橢圓形。然而實際的天體上，從長年觀察這個軌道所記錄的看來，橢圓的近日點亦即圖中的P點逐漸移動，其進行方式如51圖。

當然太陽系的行星並不是處於理想的狀態，所以單用牛頓力學對於這種現象的原因加以說明，也可以獲得某個程度的理解，但是仍然有一部分是無法說明的。下面我們以能夠淸楚其地觀測近日點移動的水星爲例子，進行一些探討。

水星距離太陽最近時爲四千六百萬公里，距離最遠時爲七千萬公里，環繞太陽成橢圓形。從十八世紀以來多數的觀測資料加以分析，近日點在百年內約移動五千六百秒，然而這個值包含觀測系亦即地球本身受到太陽及其他天體的影響而移動的差值，因此必須加以扣除，所得的值大約是五十七秒。而且根據牛頓力學所做的詳細研究，其中有很多還受到其他行星（如金星）的影響。

但是即使扣除這些，百年之內仍有四十三秒的近日移動，一秒的角度爲一度的六十六分之一的平方，因此百年四十秒的移動是微不足道的，但是在天文學上則是一個很大的問題，困擾不少的科學家。同時這種差別經

由愛因斯坦的一般相對性理論直接加以說明，根據愛因斯坦的理論，即使完全沒有其他的影響，仍會發生如圖的近日點移動，其值和實測值是一致的。

而且在計算上嚴格需要一般相對論的運動方程式和重力場方程式，因此成爲一般相對性理論的全體系的重要查證。像這種近日點的移動當然不限於水星、金星、木星、地球等也能夠觀測到，同時除了環繞太陽公轉的行星外，環繞行星的第五衞星，百年會有三十七分的變化，甚至也有比水星觀察條件更好的小行星存在。

人造衞星的實驗

近日點的移動還和其他不同種類的特別相對論效果有關係，那就是太陽自轉的影響。

普通的近日點移動，可以解釋爲由於太陽（或行星）的存在，其周圍的空間彎曲而發生，但那是假設太陽靜止時，並沒有考慮到太陽自轉的影響。

但是嚴密地思考相對性理論時，隨著太陽的自轉與否，近日點移動的方式也不同，這個問題在一般相對性理論發表後，立刻由連滋、廸林克等學者的深入研究。

水星近日點移動的情形受到太陽自轉的影響很小，但是木星的第五衞星或土星的第一衞星等（這種情況下行星的自轉也是一個問題），則成爲觀測可能的值（百

年數分至數秒的程度）。

經由中心物體的自轉，環繞其周圍的物體受到影響的情況和電流圍著線圈旋轉，其周圍產生磁場（亦即線圈成爲磁石）影響流動於四周的電子的現象相似。亦即由於電力的作用產生磁場，這種電磁場的現象在重力場同樣也有，利用這種類似性，將一般相對性理論的問題換成電磁場理論來解釋，這種研究正在進行。

近日點的移動爲一般相對性理論最有力的查證，這點剛才已經強調過，但很可惜的是用人爲設計的實驗目前還沒有進行，因此有不少人提議使用人造衞星來調查，最具代表的是席富等科學家所做的人造衞星中廻轉物體的方向變化的調查。

例如人造衞星裏，裝載高性能的廻轉儀，以測定其方向的變化。方向的變化分爲不必經由一般相對性理論就能求出值，以及必須經由一般相對性理論才能求出值兩種，後者包含地球自轉的影響。另外調查裝載於人造衞星的時鐘的延遲情形，太空雷達電波的彎曲，因重力場而雷射光延遲等，各種實驗和計畫正在進行。

不少人嘗試將愛因斯坦的一般相對性理論精密化，但是只要以上的各種實驗能夠精確地進行，形狀能夠清楚地顯示出來，就足以使物理學界再度活躍起來。甚至於如果能夠輕鬆地觀看太空梭所做的實驗，那麼直到目

前對於一般人還帶有神秘感的一般相對性理論，就能夠親身體會到。

本章爲一般相對性理論的說明，內容極爲樸實，從下一章開始，將擴大範圍，談論一些科幻小說的內容。

五、宇宙重力波的秘密

這種突發事件的概率非常少，但一些資料顯示出檢驗器由重力波而作用。（J．韋伯）

新的波"重力波"

一九六九年六月十六日的報紙的記事，或許將永遠留在科學技術的歷史上，因爲報紙大大地報導了美國馬里蘭州立大學的J．韋伯博士所領導的一群研究人員，證實了重力波的存在。

韋伯博士在記者會上說：「愛因斯坦的一般相對性理論所預言的"重力波"，經由我們證實了它的存在，這是一件令人非常興奮的事」。這個偉大的發現被認爲和上個世紀末，德國物理學家赫芝發現電波並駕齊驅。

韋伯博士們的實驗結果和解釋如果正確，則這條新聞的確令人興奮，在證明愛因斯坦理論的正確性上又增加了一個事實，總之它使我們看到了另一個新的世界。關於新聞的內容後面再談，首先從"重力波"這種新的波開始解說。

前幾章已經說明過，重力波是從愛因斯坦的一般相

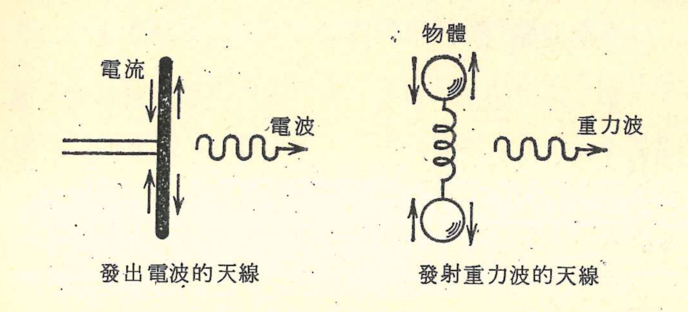
對性理論的方程式所出現的一種波動，在一九一六年愛因斯坦本人已經預言，並且發表了理論的計算結果。

如同字面所說的，重力以波動的形態傳播於空間，我們日常所接觸到的（當然眼睛無法看到）波動中，最便利也最普通的是電磁波。電磁波和音波不一樣，即使在空氣中或眞空中也能夠傳播，而且其速度和光速幾乎相等。

光也是一種波長非常短的電磁波，當然我們常常也能接觸到，但這個世界上還有一種和電磁波具有同樣性質，亦即具有在眞空中以光速度傳播的性質的波動存在——那就是重力波。這種和電磁波相似性質的重力波，經由愛因斯坦的理論簡單地加以證明，不管數式上的問題如何，其物理的意義和視覺的印象可以經由和電磁波的對立而獲得理解。

首先請看 52 圖。52圖左爲發出電波的天線，我們可以想像是電視的天線。電波從天線放射出來，簡單地說電的粒子振動，亦即電流向正負兩個方向流動的話，產生電力振動，這種電力的振動成爲電波傳送出去，和這種相同的現象在重力方面應該也會發生，而且是可以期待的。

如圖右，電在天線的導體中移動，重力源的物體產生振動，電力源的電子移動時會產生電波，重力源的物



第52圖　電波和重力波的發生裝置

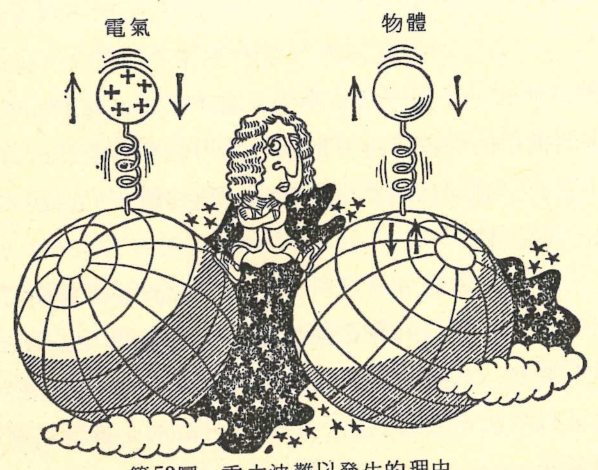
質移動的話，則一定會產生“重力波”。事實上右圖以愛因斯坦的理論來推算的話，重力波朝著箭頭的方向傳送過去，亦即這個產生振動子的重物體，可以說，就是重力波天線。

科幻小說迷和喜好科學的人，由於這個實驗而心胸充滿希望，只要移動物體就能產生重力波，這是一個偉大的發現，那麼就可以搖動岩石或鐵球等，使它產生重力波以取代電波來通信，但是很可惜的是事情並不是那麼簡單。

儘管一部分的物理學家積極地研究，重力波這個東西還不能經由人類的手自由來控制，實在是一個不好處理的東西，其原因在那裏呢？

“重力波”爲何那麼弱……？

最大的原因恐怕只有一點，那就是重力波非常的弱這個事實，爲何那麼弱呢？我們以第 53 圖來加以說明。圖左表示一種天線，和地面連接一條彈簧，然後在上面充電，亦即裝上充滿電力的球，上下能夠搖動的裝置，這種裝置當然可以產生電波。

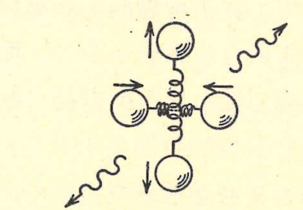


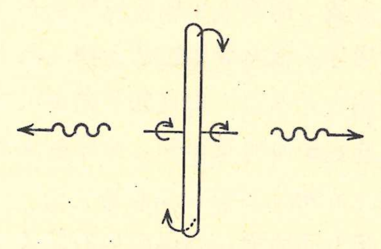
第53圖　重力波難以發生的理由

圖右爲使用物體的裝置，亦即重力波天線。從外表看來兩者好像是以同一個原理放射波，但是在物理法則上重力波比較不適合，左右兩邊實際上是以不同的原理各自行動。

對重力波較不適合的物理法則，亦即最初出現在力學的“動量守恒原理”。取名“原理”可能過於嚴肅，但這是我們日常所能經驗到的，直接去理解並不是很難。在光滑的地板上推動東西，由於反作用自己移動至相反的方向，這是“動量守恒原理”的一種表現，我們現在就拿第 53 圖的右圖來考慮這件事情。

在地上將球狀的物體從上面壓下來時，由於支持這個球狀物體的地球是漂浮在宇宙，並沒有其他東西支持


發生能率比較好的振動子
（重力波朝垂直紙面的方向發出）


愛因斯坦所要求的廻轉棒型重力波發生裝置

第54圖　具代表性的重力波發生裝置

住，因此即使力量很小，地球也會向相反的方向移動。即使移動很小，由於質量很大，其移動對重力場的影響很大，可以消除因球狀物體移動所產生的重力場的變化。

立即根據“動量守恒原理”，不能單獨地移動球狀物體，必需要有支撐物體的台，而且台還朝著相反的方向移動，以減少大部分的重力波，因此重力波只能傳送一小部分。

然而電波就沒有這種現象，移動球狀物體的電力，其支撐台和地球的電力並不會朝向消除電波的方向移動，換句話說，電波能夠有效地傳送出去。而重力比電力弱的原因，是由於重力波本身是微弱的。基本粒子論的相互作用上，電力和重力的差別爲10^{-35}。

總之，即使重力具有像地球那麼大的質量，所產生的力量也是很微弱的，而電力方面只要磨擦墊板，就能夠產生吸紙的力量，兩者大小的差別應該很容易理解。

即使集合地球公轉所發生的重力波，其力量也不過是一個電燈泡的力量而已。但是物理學界的大師們卻不因爲重力波過於微弱而放棄研究，他們利用各種手段，努力製造出發生和檢查重力波的裝置。

如第 54 圖上面將彈簧弄成直角的裝置，就是一個原始的例子。交互移動直角的彈簧，則一對的重力波的力量變成三倍，向特定方向放射的波也增強。其次下面的迴轉棒，是愛因斯坦最初計算的發生裝置，由於是迴轉，比上面的彈簧裝置在操作上更爲簡單。

棒越重則迴轉越快，重力波放射較多，但是牽涉到材質的問題，迅速迴轉重棒仍然有個限度，否則反而會弄壞。具體上調查的結果，可以知道緩慢迴轉大棒比迅速迴轉小棒在效率上比較良好，根據某個計算，從一根長一公尺的棒，每秒能放射出10^{-30}爾格的重力波。

不過其值還是很小，可以用同樣的裝置檢查出外來的重力波，但其效率比電視機或收音機的收信天線還要差很多，於是有人考慮到利用其他種類的重力波放射檢查裝置，而韋伯博士的提案，實驗的利用壓電效果的裝置就屬於這種。

捕捉從宇宙來的重力波

唱盤一般都使用晶體唱頭，而且很多是裝置很簡單的。將針的振動轉換成電氣信號的部分，其方法是使酒石酸鉀內的結晶機械地振動，配合振動電壓產生特殊作用，唱頭即是應用這種作用的裝置，這種現象稱爲壓電效應，也可以應用在其他方面。

同時相反的，注入電壓時結晶會引起機械地振動，這種裝置的用途也很廣。晶體收話器也是如此，水晶的精密發振器常被使用於電波的源頭，水晶時鐘也是應用

這種裝置。

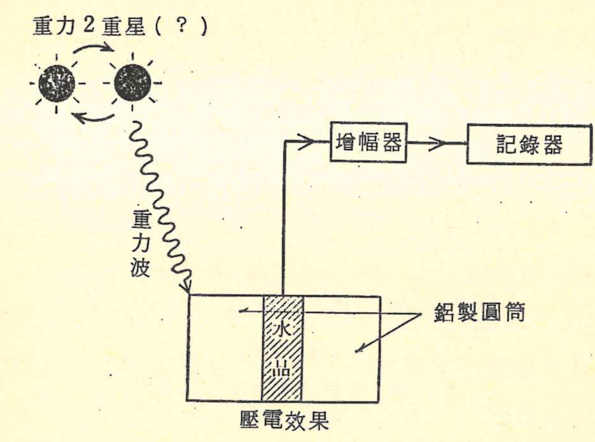
J．韋伯博士很早以前就提議將這種壓電效應利用於重力波的發生和檢查上，其原理我想不必說明，重力波會引起物質的機械振動，只要有質量，當然晶體也可以。

將有壓電效果的晶體使用於重力波的檢查器，則檢查器裏面所發生的機械振動當場變換成電力振動，電力振動經由收音機等簡單地增加頻幅，而且由於可以記錄下來，是一種效率很好的重力波天線。

重力波的發生也一樣，將晶體安放好，然後通過電壓，引起整個晶體機械振動而產生重力波。這種方法比起迴轉棒子或振動球狀物體在效率上要好很多，但是即使應用這麼巧妙的裝置，來產生或檢查效率不好的重力波，卻不是一件簡單的事。

韋伯博士本人發表了以下的計算結果。首先是重力波的發生，使用效率最好的方法時，在長五十公分的晶體破壞之前強烈地振動，則波長一公尺的重力波每秒只能放射出 10^{-8} 爾格。另一方面檢查也是同樣的裝置，最低為 10^{-8} 爾格的感度，亦即如果產生的重力波，其力量沒有達到一百億倍，檢查裝置不會有反應的。要使檢查裝置的感度提高至很完全的程度，必須一下子使用數十萬個晶體，或是有數百公尺的巨大裝置，而事實上

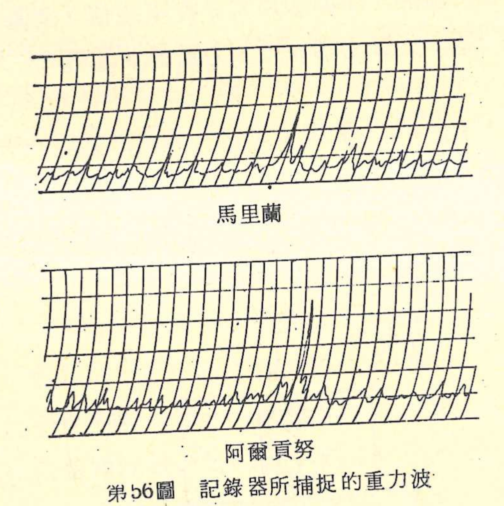
這是不可能的，不要說用重力波來通信，連基礎的實驗都有問題，人類必須放棄重力波的實驗嗎？



第55圖　韋伯博士的重力波檢查裝置

其實並不需要。目前世界上已經有更好的重力波發生裝置存在，那就是天體。發生重力波的天體當中，首先要考慮的是“二重星”，由於一般認為存在於宇宙的恒星系中大部分是二重星，天然的重力波發射源非常豐富，這是一個希望之源。

像怪馬星座阿爾發星這種和太陽大同小異的恒星系裏，是不可能放射出強力的重力波，最有希望的是白色矮星、中性子星等超高密度星球的二重星的末期。像這種星球在理論上有可能放射出在地球上可以檢查出來的



第56圖 記錄器所捕捉的重力波

重力波，另外超新星的爆炸也有可能產生相當的重力波，甚至於目前還不知道的天體，或許可能產生重力波。

現在我們再回頭注意一下剛開始的那則新聞，以下是新聞的說明。

馬里蘭大學的物體學教授，研究重力波的世界第一號人物J..韋伯教授所率領的一群研究人員，爲了檢查出從宇宙發射出來的重力波，開發出由重一·四噸的兩個鉛製氣缸，以及經由壓電效果而取出振動的晶體所組成的精巧的裝置，並且做了幾年的實驗（這種裝置和前面的彈簧型很相似）。結果幾天當中會有一次瞬間的異

常振動現象發生。

韋伯博士認爲這種現象無法用地震、雜音、電氣現象等知識加以說明，那是因爲有重力波的原因。這種裝置可以檢查出極微小的振動，所以必須冷却至零度左右，同時爲了不使整個裝置受到地上其他振動的影響，用整塊巨大的鋼筋水泥圍起來。而且爲了使實驗更正確，將兩個裝置其中的一個，設在距離大學一千公里的伊利諾州的阿爾貢努。

韋伯博士後來繼續做這種實驗，將測定的結果以論文的形式發表出來，同時他宣稱在最近的將來，把這種重力波檢查裝置移至月球，進行更精密的實驗是可能的，甚至於計畫將地球列入檢查的對象。由於這是第一次成功地檢查出重力波，如果這種現象能夠更正確的話，可以說是人類物理學史上的一個大發現。其中或許還隱藏着外星人所發生的信號，這對科幻小說迷來說，確實是一個令人振奮的消息。

日本東京大學的平川先正教授在檢查裝置方面下了不少工夫，繼續努力於重力波檢查的研究。

將重力波應用於通信的理論上的研究，目前在日本很興盛，電子通信學界的理論家們開始互相合作，並且發表了很多有關的論文。

另外在天體現象方面，最近美國的學者們發表他們

觀測的結果——形成連星系的中子星的公轉周期的延遲和重力波放射的理論是一致的——引起大家的注目，這方面今後的發展自然很有希望。

六、科幻小說裏的道具

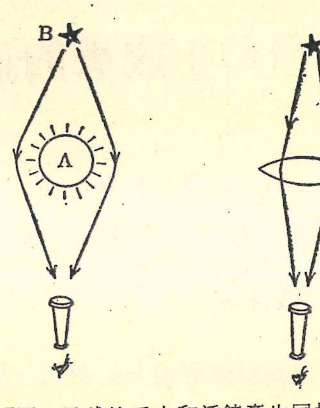
科學上的理論爲何要提倡那麼多種——我們對這樣子的事通常不會去注意。（福雷德・何爾）

奇觀！重力透鏡像

愛因斯坦的理論隱藏著很多的夢想，而這些夢想不僅是科學家，也一直刺激著業餘的科學愛好者和科幻小說迷。於是我們將應用科幻小說裏一些常見的道具，來介紹愛因斯坦的這些夢想，首先要講的是“重力透鏡”，前面已經說過，光線具有因重力而彎曲的性質。

掠過太陽邊緣的星光，在太陽的旁邊會稍微彎曲，而這種彎曲可經由觀測來證實，這個發現是使愛因斯坦揚名於世的最直接的原因。那時有不少頭腦聰明的人認爲，如果擴大思考這種現象，將會發現一些非常有趣的天然現象。

如果掠過太陽右邊的星光向左側彎曲的話，掠過太陽左邊的星光當然會向右側彎曲，描繪出對稱的曲線，亦即如同第 57 圖，從同樣的星球B放射出來的兩條光線掠過A的兩邊時，各自向相反的方向彎曲，然後再於



第57圖 星球的重力和透鏡產生同樣的作用

某個地方會合。像這種光線彎曲的方式，從 57圖 可以知道，其作用和凸透鏡完全相似，亦即使用重力取代鏡片這種出人意料的重力透鏡，可以使用於宇宙空間，這實在是一個很有趣的現象。最初將這個問題向愛因斯坦提出詢問的，聽說是電工技術員R.W. 曼得爾，那是一九三五年的事。愛因斯坦在次年回信給曼得爾，指出由於重力透鏡的效果，可以增加星球光線的強度。

太陽不僅能彎曲星光，整個作用就像透鏡一樣，這在以前就有人提到，但是很可惜的是由於地球和太陽的距離太近，從地球觀測掠過太陽旁邊的星光，是不可能看到透鏡效果的。

如果經由較遠的星球A，然後比A更遠的星球B的

光線集中，其焦點剛好射在地球上，還是可以考慮到透鏡效果。像這種因恒星而產生的重力透鏡效果，直到現在不知道有多少的學者提出議論。最近天文學界發現，放射出非常強烈光線的星球（例如似星體），實際上是經由重力透鏡而增強的。

我們參考 S. 黎布斯最近在美國物理學會雜誌上所發表的論文，來介紹這種有趣的重力透鏡。

首先，經由重力透鏡（恒星）而形成的星球的形像，大略說來可以分爲四種形態，如第 58 圖。

擔任透鏡的星球和從那透鏡放射出光線的星球，如果從地球上看是成一直線排列，那麼就像圖的左上方爲環狀的形像。中心白色的圓圈代表擔任重力透鏡的星球，黑色的部分爲經由透鏡效果所形成的星球B的形像。

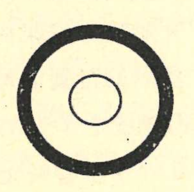
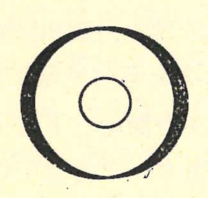
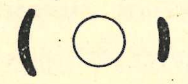
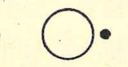
隨著光源的星球和透鏡的星球的位置偏差，像的型態從右上方變成左下方，然後再變成右下方的型態，如果偏差過大，那就看不到像，亦即只能看到光源。

實際上要清楚地觀測到這些形像，必須要有相當的分解能力，普通的望遠鏡根本不可能。但是由於像的光線集中的關係，比起直接看那個星球，應該較爲明亮，因此即使像的形狀不明顯，在夜晚的空中仍然可以看到極亮的一點。但是，星光藉著重力透鏡效應而看起來光度增強的或然率到底是多少呢……？

一般認爲銀河系裏面有一千億多的星球存在，在這麼多的星球當中，由於每一個都可能是光源，也可能是重力透鏡，因此可以經常觀測透鏡效果，但事實上並不是如此。

從地球觀看兩個星球剛好並列成一直線，或距離關係適中的或然率並不是很高，更何況銀河系的星球都是互相移動的，即使偶而有透鏡效果的發生，也不可能持續那麼久。

在這裏我們列出黎布斯所得到的數字。能夠使量光增加一千倍的重力透鏡效果，百年只能發生一次，而且經過十六小時後立即消失。另外能增強百倍的效果，每十年才可能觀測一次，也只能持續六天。十倍左右，比

第58圖　經由重力透鏡所形成的星球的像
（中心的圓圈爲擔任透鏡角色的星球）

較弱的透鏡效果發生比較頻繁，一年一次，能持續發生兩個月。

看到這些數字後，這種具有魅力的重力透鏡效果，實際上觀測起來並不是那麼容易。即使十年一次或是一年一次，也不知道是在天球的那一個方位，由於現象發生的星座和位置都沒有一定，除非運氣好，否則是很難發現到的。

目前所報告的一些天體現象當中，還沒有人確定是重力透鏡效果，只是或許有這種現象。重力透鏡效果不僅發生在分散於銀河系內的一般恒星，也可能發生於球狀星團、中子星、白色矮星、宇宙黑洞或其他星雲中的星球等，但雙方的效果都不很大。

雖然重力透鏡效果並不是那麼容易就能觀測到的現象，但是星球本身成爲巨大的透鏡，加強其他星球的亮度，使我們能夠看到一些奇妙的景像。只要想像這種現象存在於宇宙，也是一件快樂的事，它使我們忘掉人類之間的爭鬬，把整個夢想寄託在那裏。

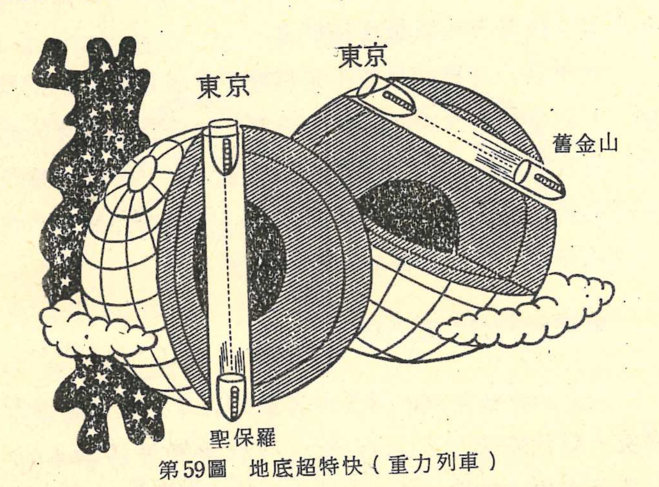
地底超特快"重力列車"

未來的運輸車輛，G T V方式的火車正在美國進行研究。G代表重力（ Graviey ），V代表眞空 (Vacuum)，T代表輸送路線（ Transit ），也叫重力眞空輸送方

式。

原理很簡單，在地下挖一條隧道使成眞空狀態，利用眞空來行駛列車，同時在車站的中間挖深隧道，利用重力使列車能夠行駛，其裝置就像遊樂園裏的空中飛車一樣。

對於實際著手研究這種新式交通工具的開拓者，我們覺得很敬佩，但是利用重力做爲列車的推進力這種精明的想法，其實並不是最近才有，從前的通俗科學書裏面已經有記載過。目前研究中的ＧＶＴ雖然不是要在很深的地方挖掘隧道，但是在原理上利用重力的列車，其規模是相當大的，這種概念我們以第 59 圖來表示。大



第59圖　地底超特快（重力列車）

家都知道這是一個偉大的構想，挖出一條直通地球另一端的大隧道，使列車在裏面行駛（例如從東京到南美聖保羅）。

如果隧道內的氣壓非常小，而且也沒有危險的熱氣，那麼從東京出發的列車，亦即地底超特快“重力列車”被重力所吸引，朝向正下方急速落下，在地球的中央達到最高速度。以後由於反方向的重力作用，速度逐漸減低，到達地球的另一端聖保羅時剛好停止。如果就這樣不管，又將朝著地球的中心落下，再度回到東京，所以必須使用某種裝置來制止列車，然後使擁擠的乘客們朝上下車，走出地球表面。

根據筆者的計算，如果除重力以外其他力沒有對列車產生作用，而且假定地球的地殼很平均，那麼東京——聖保羅之間所需要的時間大約是四十分鐘，這是多麼令人振奮的速度，噴射機當然不用說，連未來的飛彈型民航機都無法達到這個速度。

同時這種“重力列車”還有其他運輸工具所沒有的特色。其中之一就是不必使用燃料，利用重力啓動，同樣地利用重力使其停止，列車本身並不需要任何力量。另外一個特色是逐漸加速和逐漸減速，裏面的乘客沒有受到任何力量衝擊，亦即在四十分鐘之間，重力列車的乘客們和阿波羅太空船的太空人一樣，可以享受“無重

力狀態”。

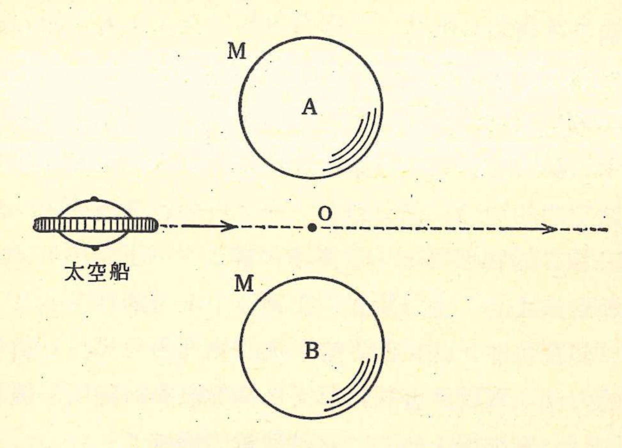
討厭無重力的人經由適當的迴轉，可以到人工重力的客室，但既然只有四十分鐘，遊玩於無重力的空間，也是一項很別緻的旅程。理論上“重力列車”另外還有一個有趣的特徵，那就是所需要的時間不變。假使一直線行駛於地下，從東京到另一端的聖保羅，或是斜穿地殼到舊金山，雙方所需要的時間相同（四十分鐘），以數式來表示的話，從東京到大阪或橫濱都是四十分鐘（當然由坐地列車到較近的地方時，行駛曲線型的隧道要比直線在時間上較快也較實用）。

另外還有一種不變性，那就是如果地殼密度相同，即使地球的半徑有變化（不管是兩倍或一半），到達時間仍然是相同的，這是牛頓力學的基本性質，物質的萬有引力和距離的平方成反比例，這個實例使我們感覺到宇宙間的秩序。

没有衝擊的加速度

重力列車雖然是一種很有趣的交通工具，但是它只能在地球的地底行駛，對於愛好科幻小說的人來說或許還不夠刺激。但是它仍然有兩個特色——亦即在加速度時感覺不到任何衝擊，以及本身不必携帶燃料，這兩種性質應該還有利用的價值，當然是應用到太空旅行上，

就像從東京到聖保羅一樣，可以用同樣的方法從太陽系旅行到怪馬星座阿爾發星球，請看第 60 圖的“重力裝置”。



第60圖 最簡單的“重力裝置”

原理方面可以不必說明。首先準備擁有質量M的兩個星球A和B，將太空船放置在A和B中間的線上時，太空船經由A、B的引力開始移動，然後沿著這條線一直前進。這時的加速度當然和行駛隧道的原理一樣，船內的人没有受到任何壓力，和第五章敍述過的自由落下的電梯內爲無重力，現象完全相同。

這實在是一種很方便的“重力裝置”，如果A和B都是重力星球，那麼加速度也會變快。照這樣情形星球

A和B會互相吸引而發生碰撞，但只要迴轉於點線的四周，如二重星一樣，仍然可以避開這種危險。

但是仔細考慮的話，這種裝置仍然有致命的缺點，那就是當通過0點時，受到引力的反作用，太空船的速度減慢，無法到很遠的地方去。

關於這個問題的解決辦法並不是沒有，當太空船到達中心點0的瞬間，將星球A和B移到別的地方，或是遮斷它們的重力，在幻想上這種重力裝置或許可能，但是在現在的物理學上，這種解決辦法原則上是不可能的。那麼眞正的“重力裝置”在物理上不可能存在嗎？

其實並非如此，世界第一流的物理學家提出一種巧妙的方法，那就是普林斯頓大學高等學術研究所的佛里曼・J.泰森博士的“二重星型重力機械”。

泰森博士爲恒星間旅行的積極支持者，同時在活用這方面的專門知識上也非常有名。根據博士的說法，利用重力的機械必須考慮到天體範圍的宏大，這是一個缺點，但是基於下列兩個理由，還是有研究的必要。

①人類的發展相當快，在不久的將來，文明圈會達到天文數字的規模。

②那時人類或許會和擁有高度發展的技術的種族接觸。

這種主張的具體的例子，泰森博士提出“二重星型

重力機械，這個偉大的構想到底是什麼呢？以上我們按照順序來加以說明。

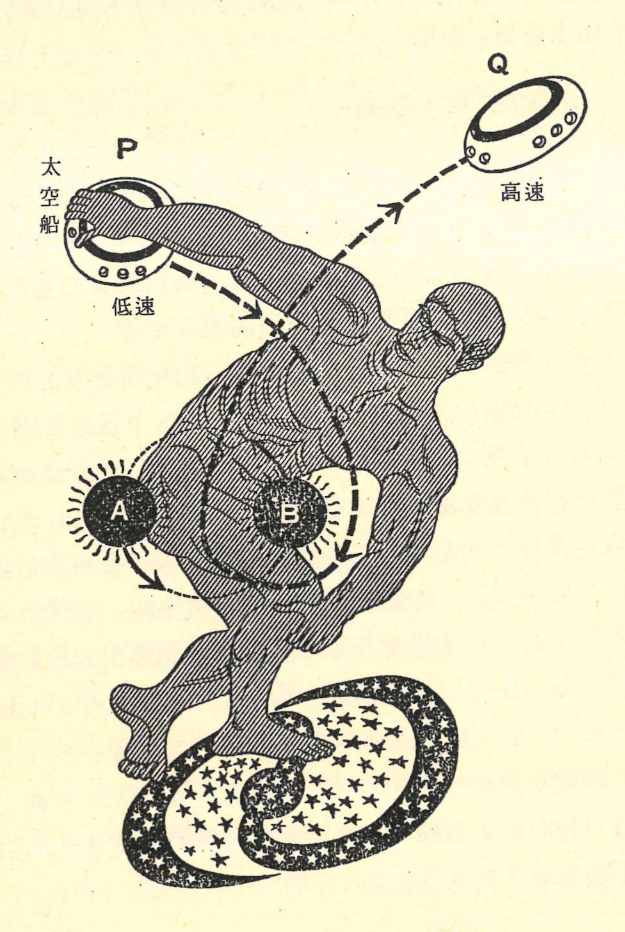
偉大的“重力裝置”

重力機械是以彼此互相迴轉於對方周圍的二重星爲其基本，二重星在宇宙裏是極爲常見的星系，在離地球不遠的地方可以看到許多這種星球，我們的目的地怪馬星座阿爾發星，在實質上也可以說是二重星。

爲了使話題更簡單，我們以具有相同質量M的二重星A和B爲例子。如第61圖，現在A、B正以如圖的方向進行廻轉，從不遠的P點，太空船正以低速度逐漸接近。這時適當地調節太空船的方向和前進時間，使它掠過逐漸接近的星球B的旁邊。這麼一來太空船被星球B的引力所吸引，如圖的點線一樣廻轉半周，然後飛向Q點的方位，在力學上和小球碰到大球飛彈出去的狀態非常相似，接近以後被掄起，彈出的過程都是重力的作用，而飛行員完全感覺不到彈性衝撞時的震動。

問題是速度，這和星球在軌道上移動的速度有關，到達Q點時的太空船，其速度約爲星球B（或A）的兩倍，請參考下列的公式。

$$V=\sqrt{\frac{GM}{R}}$$



第61圖 利用二重星的巨大重力裝置

G為重力常數、R為二重星的軌道半徑、M表示質量。要使在沒有任何衝擊下將以速度V行駛的太空船在到達目的地時停止，同樣地可以利用二重星的反作用。亦即在宇宙銀河系的每個地方取出適當的距離，只要準備這種二重星型重力機械，就可以成為太空船的轉繼站，太空旅行的中繼站（說不定閃爍在夜空的幾個二重星，已經被高度發達的外星人利用為中繼站！）

其次我們來探討具體的數值。經由這種重力機械——重力裝置所得到的速度，由於只有星球迴轉速度的兩倍，像怪馬星座阿爾發星這種星系，是不可能得到較高的速度。從前面的公式我們可以知道，兩個星球的間隔越小則速度越大，而且質量M越大則速度也越大。因此最好還是使重力星球（高密度星球）在近距離內迴轉，或是尋找那樣的星系。

兩個星球的間隔，受到星球本身大小的限制，因為如果相碰，就沒有意義了。為了儘量使效率提高，使用即將衝撞的地方的話，軌道的半徑R將可以縮短至星球半徑的兩倍。

另一方面，在質量上假設和太陽相同，雖然也有可以使用更重的星球，但是如後面所敘述的，大質量星球半徑會變小而成為高密度的星系，結果還是和使用重力星球會一樣。而且具有和太陽相同質量的星球到處都有，

同此非常方便。

第一首先使用和太陽同樣大小和重量的兩個星球的組成的二重星，這時重力機械的效率非常差，計算的結果是使用光源比較有利。太空船所得到的速度爲光速的千分之一，以這種速度要飛行於恒星之間是很困難的。

其次我們考慮到以高密度星成名的白色矮星（將恒星的歷史比作人的一生，如同退休後晚年的星球）。質量和太陽一樣，直徑爲七十分之一的話，速度可以達到光速的百分之一，這時的二重星的周期爲 70 秒——亦即一分半鐘迴轉一次，速度相當快。

或許你會認爲光速的百分之一的速度並不是那麼高，但是重力機械最大的特徵爲沒有衝擊的加速，在這種情況下實際仍有可能瞬間達到一萬G的加速度（等於地球重力的一萬倍），但是船員和船體除了一種潮汐效果外，並沒有其他力量產生作用，也沒有其他危險，更不需消耗燃料，其行進方式可以說是近於奇蹟。所謂潮汐的效果就是太空船的一邊和另一邊，由於星球的引力不同所產生的付加的重力場，而白色矮星的加速只不過在1G左右，因此可以不必擔心。

而且白色矮星並不是宇宙中最高密度的星系，其他還有中子星，這種由於密度太高，連原子核都受到破壞的星系，其質量和太陽相同，半徑只有十公里，實在是

一個特別的星球。

如果有利用這種中子星的重力機械，則太空船的飛行速度應該可達到光速的百分之八十到九十，這麼一來怪馬星座阿爾發星的旅行就很容易達成了。這種中子二重星每秒迴轉兩百次，其速度是相當驚人的，這實在是一個擁有強大力量和超高速度的重力裝置！

其實，利用迴轉的星球的重力於太空旅行上，並不止於需要準光速、高密度星系等範圍較大的情況，小規模的情況也能適用。例如在太陽系內部的行星之間飛行，從地球到火星時，可以經過金星的旁邊，甚至於利用星球自轉也不是不可能的。

非常重的星球

波蘭的有名科幻小說家史塔尼斯拉夫・雷姆的成名作（金星無反應）裏，描述一段有關金星上奇怪的白球。

「從黃色到紫色，彩虹的所有顏色陸續開始閃爍起來，這時我好像被誰拉住，身體失去平衡搖晃了兩三步——突然強烈的光線閃爍在眼前，眼睛暈眩了兩三分鐘。等張開眼睛時，白色的光整個籠罩在閃耀而巨大的球中，四周都是平滑的圓壁，我想進來的入口應該在身後，但是當我回頭的時候什麼都沒有了，到處都是平滑的牆壁……。

後來發生了一件很奇怪的事，大概前進了四、五公尺時，前面的牆壁突然移到後面。……我想大概走到牆壁的附近，用手應該可以摸到，這時突然發現自己站在球壁的下面，可能已經被擠出球外……」。

這種奇異的現象，後來立刻經由太空船的物理學家做了極爲詳細的說明，這是因爲中心的白球爲人工的重力源，結果使周圍的空間極度彎曲所產生的一種現象。

當然以我們目前的物理學，還不可能製造出這種人工的白球，但是愛因斯坦的一般相對性理論卻認爲，在廣濶的宇宙中，可能有顯示出和人工白球性質相同的星球存在。那就是比前述的中子星的密度更高，質量和太陽相同而半徑只有兩、三公里的超級高密度星系。

但事實上想像質量和太陽相同而半徑只有兩公里的星球是非常困難的，太陽實際的半徑約爲七十萬公里，將七十萬公里縮小成二公里等於是三十五萬分之一，這相當於將保齡球壓縮成一厘米的一萬分之一以下，其密度當然很高，如果是地球，則必須壓縮成半徑一公分的球。

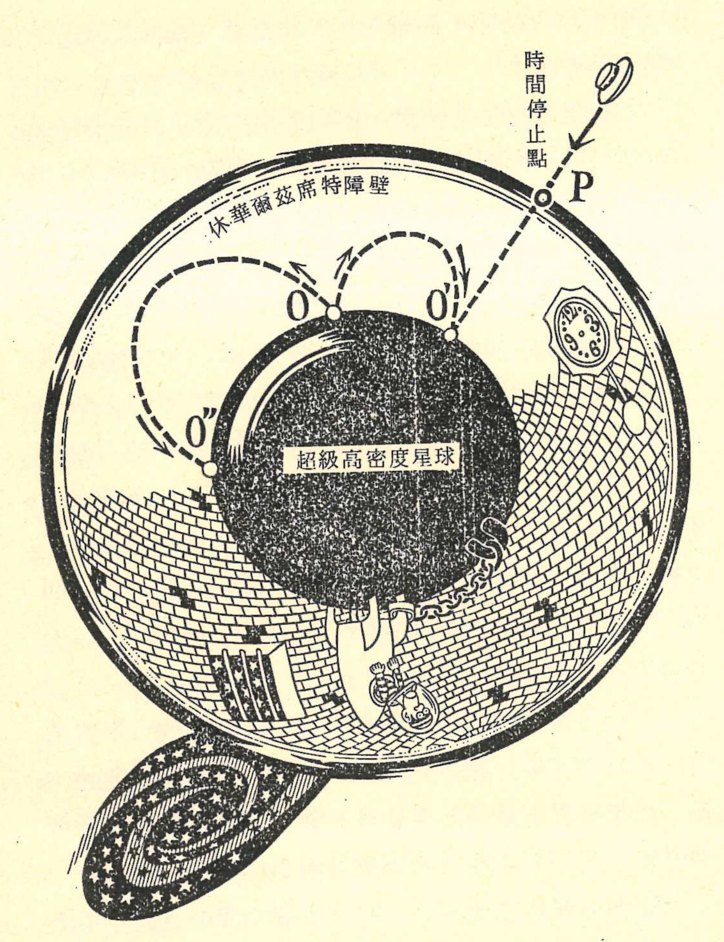
但是宇宙是那麼大，我們假設這種超級高密度的星球不會爆炸，也不會在宇宙消失而一直存在著，那究竟會產生什麼事呢？請看第 62 圖，像這種星球的最大特徵爲表面的重力特別大。星球表面重力大小的標準，可以經由太空火箭的"脫離速度"來計算，而且這種方法也最容易理解。

如果從地球表面出發，要飛到引力圈以外的地方去，剛開始的瞬間需要達到每秒約十一公里的速度以上才可以，此最小需要的速度稱爲地球的脫離速度。引力小的時候，所需要的脫離速度也小，從月球起飛只需要每秒兩公里就夠了。相反的，引力大時，脫離速度也必須加大，從太陽脫出時則要達到每秒六百公里的超高速度。

那麼逐漸將太陽壓縮後又會變成怎樣呢？由於質量相同而半徑縮小，當然表面的重力跟著增加，因此脫出速度也增加。半徑縮小到二分之一或十分之一的程度還可以，其數值不可能超出我們的想像，但是壓縮成三十五萬分之一，會變成怎樣呢？簡單計算一下當然可以知道，其脫離速度已經超過光速，只要二十三萬分之一，其脫出速度和光速幾乎相等。

因此從這樣的星球出發實際上是不可能的，即使太空船能達到光速，脫離仍然是個問題。其實不只是太空船，如果世界上最高的速度是光速，則沒有任何東西能夠脫離，甚至於連光本身也不可能！

最初計算出脫離速度必須和光速相等的表面半徑大小的是研究牛頓力學有名的物理學家拉普勒斯，時間在十八世紀末。



第62圖　在休華爾茲席特障壁裏面時間是停止的

但是在相對論上正確地解決這個問題的是天文學家休華爾茲席特。他在愛因斯坦發表一般相對論的論文後，馬上發現甚至於光速都無法脫出的表面，因此這種奇特的球面我們稱為“休華爾茲席特障壁，此半徑稱為重力半徑。

如果真的有超高密度的星球進入這種“休華爾茲席特障壁”的內側，將會發生各種奇妙的現象，其中一種就是時間的停止現象。如第 62 圖，太空船利用星球的重力機械或重力裝置而逐漸接近，前面已經說過重力越大時間越緩慢，這時當然會發生時間停滯的現象。

而且這種時間停滯根據相對性理論的結果，越接近休華爾茲席特障壁則越明顯，到達障壁（ P ）時，將達到無限的程度。

亦即時間完全停止，因此從遠方觀看的時候，太空船內的時鐘在達到這一點時突然停止，太空人像被冰凍住一樣不能移動，而且太空船本身也停止下來。

由於會發生極端的重力紅方偏移現象，觀測時所必須的，從太空船發射出來的光和電波，波長變成無限大而力量變成無限小，結果在接近障壁之前，從外面不可能看清楚太空船。

亦即太空船整個消失掉，另一方面對太空船內的人來說，時間像平常一樣移動，太空船的速度也沒有減慢

，以有限的時間穿過障壁。

用四次元時空的幾何學來表現的話，這個奇妙的障壁為擁有向時間軸的方向無限伸張的三次元表面的圓筒。

以上的說明或許很模糊，總之這種時間停滯達到極限時就會停止的障壁可能在星球的周圍出現。而且即使想從這種障壁內部的星球脫出，前面已經說過是不可能的，甚至於光也將再度回到表面，那是因為脫出速度比光速還快，周圍的空間極度彎曲。

具有這種奇特的性質的超級高密度星球（用密度來表示是否恰當，目前還不知道），在一九六〇年以前被認為理論上雖然存在，但實際上在天體內卻是不可能存在的。直到一九七〇年代，它的存在性才被承認，那就是黑洞。這種黑洞的存在和奇妙的性質經由新聞媒體的宣傳，人類對神秘的宇宙的關心逐漸提高。

筆者首先將這種奇異的天體於一九六〇年代引入科幻小說的舞台，那時對於這種奇異的天體的存在，事實上筆者本身也抱著懷疑的態度去描寫，但是目前有不少這方面的專家已經確信它的存在，而愛因斯坦的相對性理論正確地預言宇宙的神秘，可以說是功不可沒的。

黑洞的發現

直到指出黑洞的實際存在性，其經過歷史是相當長

的，甚至於在理論上將“休華爾茲席特障壁”引導出來的休華爾茲席特本人也認為，這種奇異的球面在數學上才有可能，物理上是不存在的。他簡單地計算出，唯有不能達到那麼大重力的星球，才有可能存在於宇宙。聽說始祖愛因斯坦對於這個問題也沒有表示興趣，大概是因為他本身沒有考慮到這個東西的存在性吧！

正式提出黑洞的理論的是原子彈之父，同時也是和平運動的支持者，有名的歐本海默和舒納達這兩位科學家，時間在一九三〇年代。

重恒星以自己的重力毀壞自己成為黑洞的過程稱為重力崩潰，敍述這種現象的兩位科學家的論文，在理論上極為有名。

「在所有的熱核能源消耗完後，整個重力星球將會崩壞。如果由於受到迴轉而分裂或放出物質，或經由輻射吹散物質等影響，星球的質量必須減少至太陽質量的程度以下的話，那麼重力收縮將無限地持續下去，這篇論文就是在探討記述其過程的重力方程式的解答。在第一節，關於隨著逐漸收縮，計量張量如何運作的問題我們做了一般及定性的討論。星球的半徑逐漸接近重力半徑（休華爾茲席特半徑），星球表面所發出來的光線逐漸變成紅色，大概只有從狹窄角度方向射出的光線才能到外界。在第二節關於可以無視星球內部的壓力時，找

出表示以上的結果的重力方程式的解答。對於和星球的物質一起運動的觀測者來說，崩壞的時間是有限的，在外部的觀測者的眼中，星球的半徑逐漸接近其重力半徑」。

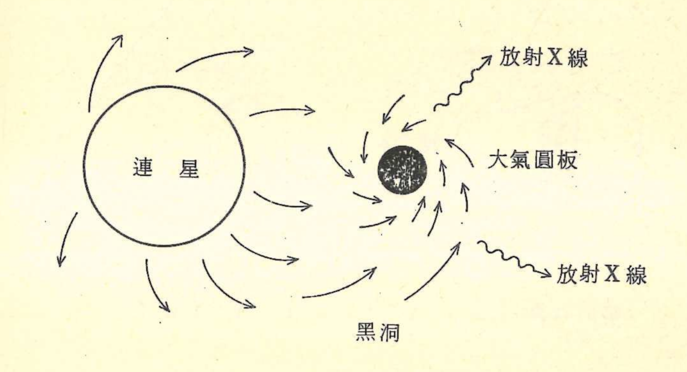
這篇理論實在將黑洞生成過程的物理現象整理的很完整。

在現實的天體現象方面，最初喧嚷「那不是黑洞嗎?!」。是在發現能夠放出很多光源的似星體的一九六〇年前後。但是有關似星體是什麼的說明，目前仍然有加以考慮的必要。

後來觀測天體的技術逐漸進步，發出X光線的天體的研究越來越興盛，X線的來源幾乎都是從白色矮星或中子星，然而發現其中也有從更特異的天體——亦即黑洞——放射出來的（例如天鵝座X－1），亦即從觀測X光線間接地確認黑洞的存在，那是一九七〇年代的前半，令人驚奇的是時間停止的障壁，實際上存在於宇宙。

經由黑洞放射出來的X線，並不是從黑洞本身放射出來的，如第 63 圖，連星中其中一個星球的物質被黑洞吸收時放射出來的。這種實在的黑洞是太陽質量三倍以上的巨大天體於重力崩壞時所形成的。

二〇〇一年太空之旅



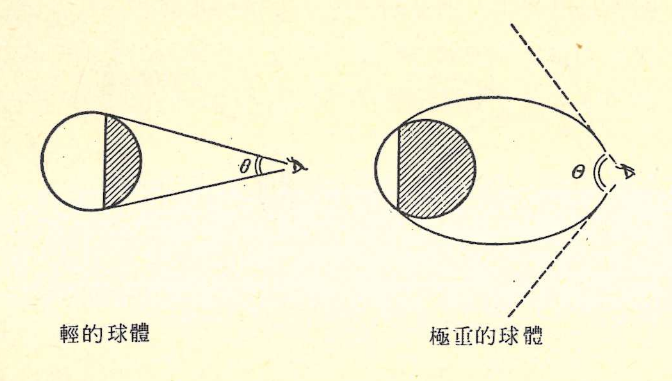
第63圖 放射X線的黑洞

爲了將宇宙的神秘應用在科幻小說上，這裏我們再來談幾個話題。

前述的雷姆「金星無反應」中的奇妙的白球由於是人工產物和黑洞不一樣，但確實是經由和休華爾茲席特障壁類似的球面所包圍的物體。當然由於是虛構的故事，時間停滯或重力對人體的影響都不重要，但是只有光線的旁曲可以使人連想到休華爾茲席特障礙。

如果人類能夠接近或觀測彎曲像這種空間的重力源，在光學上應該可以看到一個非常奇妙的像。

請看第 64 圖，左圖爲從某一個距離觀測較輕的球體（例如地球），斜線部份是我們可看見球體的部份，以 θ 角伸張出去，這是極自然的看法。

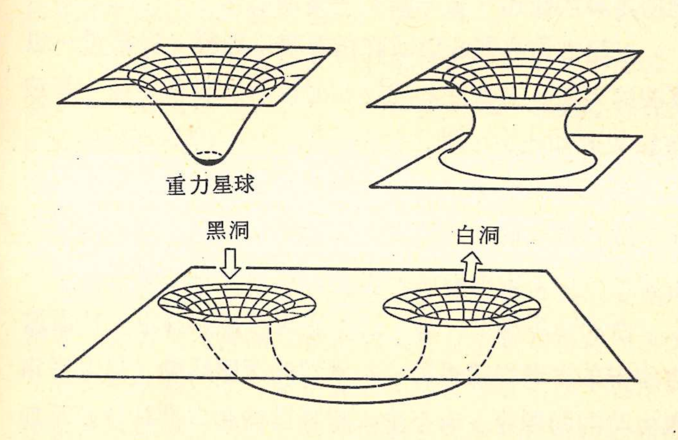


第64圖　重力球體則看的越大

但是如果這個球體非常重（如上圖）而光線彎曲的話，即使觀測者的位置相同，所能看到的斜線部分擴大很多，而且視角θ也擴大很多，亦即可以擴大看到點線範圍內的斜線部分。

如果這種狀態更厲害，球體的重力場如雷姆的白球那麼強，則斜線部分覆蓋整個球體的表面，θ擴大至三六〇度（立即連後面也包括在內），觀測者除了這個球體以外，看不見任何其他的東西。

碰到這種情況的觀測者的位置，就好像在休華爾茲席特障壁的內部，前後、上下、左右，所有能看到的東西只有白球的表面，因此在感覺上好像被白球的表面包圍住一樣。實際上在球的外側，但看起來又好像在球的



第65圖　<二〇〇一年宇宙之旅>的蟲蛀宇宙？

內側；雷姆小說裏面所描述的「張開眼睛時，白色的光充滿了整個閃耀的球中」，就是指這種錯覺，雖然這是很久以前的作品，但雷姆本人非常認眞地寫，實在令人敬佩。

當然所謂被白球包圍——只不過是誇大白球射出的光線受重力場而彎曲所產生的像的變化，內容可以說是很類似。總之，在休華爾茲席特障壁的內側，由於空間的歪斜很厲害，甚至於光都無法射出，相反的從外面來的光或物質則一直向中心投入。

然而比這種奇妙的黑洞更奇妙的是白洞。白洞仍然是一個具有超重力場的存在，只是黑洞是專門吸收而白

洞則是專門吐出，這一點不一樣而已。

以超重力專門吐出或許稍微難以理解，但是想一想電波的天線，有家庭的收信和發信所的發信兩種，電波天線接收和吐出，總之就是符號+、−的差別而已。

最近在天文學中最引人注目的是黑洞和白洞在四次元上的連結，衝入黑洞的太空船，在完全不同的時間內，從另一個宇宙的白洞飛出來，這種奇特的學說。

白洞和黑洞不一樣，還不能說已經被發現，然而遠方宇宙的大爆炸或銀河中心激烈的天體活動，以及宇宙誕生時的問題等，有不少人想將這些和白洞結合起來加以討論。

黑洞和白洞的連結，經由空間的彎曲達到極限如第 65 圖二次元模型的解說，應該可以抓住一些形像。獲得不少好評的科幻電影『二〇〇一年太空之旅』最後的部分，一般認爲原作者 A.C.克拉克就是從這種多重連結宇宙（也稱爲宇宙的蟲蛀孔）得到啓發而製作的。筆者碰到克拉克時，向他提出這個問題，當時他並沒有否定。總之黑洞和白洞確實是科幻小說中不可缺少的大道具。

反重力物質的夢想

在科學技術方面預測將有美好遠景的是剛才所說的

A.C. 克拉克所著的科幻小說（遙遠地球之歌），典型的克拉克流以宇宙爲主題的中篇。

在裏面克拉克假定人類在某種程度上成功地控制了重力，談到有關“反重力”的現象。以下是太空船拜訪離地球不遠的殖民星球塔拉沙時，飛行員雷昂和塔拉沙行星的女孩羅拉的談話。

當羅拉聽到都市的時代已經過去時，顯得非常沮喪。儘管雷昂極力說明現在整個地表完全被普通的文化所掩蓋，在考慮地球時，她仍然會連想到查德里格、倫敦、亞斯特羅格拉德、紐約等目前已經消滅的巨大都市。她仍然不相信這些巨大的都市會永久消失，都市的生活方式將從此衰微下去。

「當我們離開地球的時候」雷昂解釋說：「人口最集中的地方像牛津、安・阿巴，以及坎培拉等大學城，其中擁有五萬人的學生和老師，都市的人口甚至於連一半都沒有。」

「爲什麼會這樣呢？」

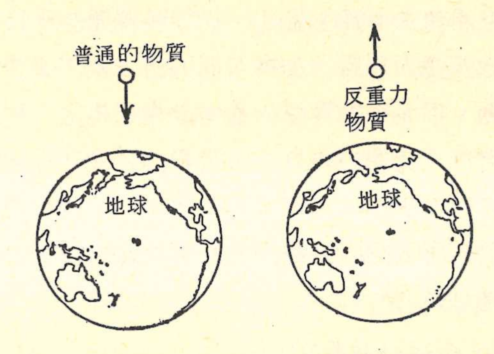
「當然原因有很多，而最主要的原因是交通工具發達，只要一按電鈕，就可以和地球上任何地方的人自由地見面和談話，都市的必要性因此少了很多。而且由於反重力被發明，不管是家具、房子及其他的東西，都可以經由空中的重力搬到任何地方去，從此以後不必再受

地球上其他事情的干擾，人類逐漸搬到自己喜歡的地方去居住，都市也就逐漸消滅了。」

雷昂和羅拉之間的熱戀，相信各位已經讀過，現在我們來討論“反重力物質”這個東西。

所謂“反重力物質”就是對於重力場，和普通的物質成相反運動的特殊物質。如第 66 圖所示，在地球表面附近拋出普通的物質時，因地球重力場的影響，物質往地表落下，這是很自然的事，因爲地心引力的作用。但是拋出“反重力物質”時，完全和前述的相反，逐漸遠離地表，亦即和地球之間會有排斥力量作用，換句話說和地球之間並不是引力而是排斥力在作用的物質，我們稱爲“反重力物質”。很可惜的是這種“反重力物質”在目前的物理學上還沒有被發現出來，但是它也不像超光速或時間機器是個夢想，不少科學家指出它存在的可能性。“反重力物質”的可能性不被強力否定的最大根據，是因爲它和“能量守恒定律”及“因果律”並不互相抵觸。

關於能量或因果關係的定律，是現代物理學最基礎的東西，要承認違反這種定律的現象或物質，在思想上必須有相當的進步，但是既然它不違反這個定律，只不過是還沒被發現，絕對不能說是不可能存在，所以克拉克才在小說中經常利用“反重力”。如果在實際上能夠



第66圖 反重力物質浮起

得到大量的“反重力物質”，一些有趣的事就可以達成，和普通的物質對半混合時，可以成爲重量等於零的材料，可以用來製造交通工具，很輕易地就可以蓋幾棟大樓，飛在空中的圓盤也就可能製造出來。

但是要收集這些“反重力物質”並不是一件容易的事。如果這種東西一開始就存在於這個世界，由於和太陽及地球互相排斥，可能飄散在遙遠的宇宙的另一邊，將那些位於遠方的“反重力物質”搬回太陽系，就好像將等量的普通物質送出太陽系外一樣，必須花費很大的勞力。

將人類從地球送上月球就已經不是一件容易的事，從宇宙的深淵收集這些有用的“反重力物質”可以想像

是非常困難的。那麼不要從遙遠的宇宙那邊搬過來，想一想是否能夠在地球上製造，立即將普通的物質加工後，變換成反重力物質，如果可能的話，就不必辛苦地在宇宙奔馳。但是從物理學的基本定律來推定，將地球上的物質變成“反重力物質”所需要的力量和從宇宙那邊搬運過來是一樣的。當然是否能夠如此，目前還不知道，因爲我們所談論的是還沒有被發現的物質，不過這種討論還是必要的。

正負質量的遊戲

以上我們只是單純地定義，所謂“反重力物質”就是和普通的物質之間會有排斥力作用的物質，但是光是這樣並不能完全決定“反重力物質”的性質，即使和普通的物質之間不具有任何核反應的東西，“反重力物質”彼此之間到底是引力或排斥力，目前還不能決定。

由於是虛構的物質，不管我們如何來假定，話題還是可以繼續下去。如果它們彼此之間有引力，或許會在距離太陽系或銀河系很遠的地方，聚集在一起形成和我們的宇宙相似的世界。如果是排斥力，彼此互相排拒，和普通的物質也有距離，在離我們很遠的空間裏如煙霧飄散各處。

當我們想像“反重力物質”彼此之間會發生排斥作用時，首先浮在腦海的是電力，我們都知道電有正負兩種，而且如果是正負之間則會有引力作用，如果彼此都是正電或都是負電，就會出現排斥作用，假如這種關係應用於物質方面又是如何呢？

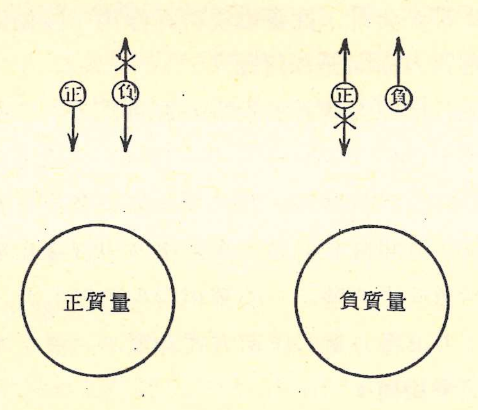
如果我們假設普通的物質的質量爲正，“反重力物質”的質量爲負，物質和電不一樣，彼此都是正則爲引力，正和負則互相排斥，同時彼此都是負時，亦即“反重力物質”之間會有引力。像這樣假想質量和電一樣有正負，話題就更清楚了。的確相同極性爲引力，不同極性爲排斥力這種力量的作用方式和電不一樣，不過其他現象則完全相同。

但是這種和電力學的單純推論，還必須注意到一點。由於質量的正或負直接關係到運動的方程式，運動的方式和電力學有些方面是不同的。荷電的粒子（例如電子和質子）的運動，其構造是以電力來推動粒子的含的質量，而單靠物質粒子的重力所產生的運動，是以其質量比例的力量來推動質量，這一點是不一樣的。

換句話說，牛頓的運動方程式是由質量和作用在物質的力量所決定，但是電和質量是沒有任何關係，而“反重力物質”的力量是由質量而來，這一點仍然有差別。總之，這種差別帶給粒子運動意外的差異。

將質量的正負應用在牛頓的理論上（近似愛因斯坦

的理論），可以知道會發生下列奇妙的現象；我們以第 67 圖來表示。



第67圖　正負質量的運動由較大物體的正負所決定？

首先我們假設左圖爲巨大的正質量例如地球，然後在附近拋出一些小正質量的粒子，當然這些會被大正質量所吸引，其次在同樣的地方放置負質量的粒子，以電來推論的話，會有排斥力的作用，因此會遠離而去。

然而利用牛頓的方程式來計算的話卻不是這樣，和正質量完全相同，仍然被吸引，亦即並不是預想中的排斥力，而是引力在作用。其次我們再看右圖，在巨大的負質量的物體附近，放置正負兩種粒子，這時不管質量是正或負，排斥力作用，兩種粒子都遠離而去。

這個問題的特點是一邊爲具有巨大質量的物體，如果雙方爲擁有同樣大小質量的物體，而只是正負符號有差別，那麼又會變成怎樣呢？

按照前面的關係，正物體吸引負物體，因此只要將正物體用某種方法固定住，則一定會碰撞。但是如果放置在自由空間，就不會發生碰撞，因爲會被負物體推開，這是一件很奇妙的事。如果正質量的物體吸引負質量的物體，而負質量的物體同時也會排斥正質量的物體，那麼將永遠處於“捉迷藏”的局面，而且兩者之間具有加速度，如果將正負兩種物體放置在宇宙空間，就會互相追趕，向遙遠的天邊飛去。

當然負質量是否能滿足牛頓或愛因斯坦的運動方程式，這又是另一個問題。同時反重力這種物質，可能會抵觸相對性理論的基本“等價原理”，也可能會嚴重影響慣性的定律，但是科幻小說中的相對性理論，是沒有必要刻意地去考慮這些問題。

“反重力物質”的存在，經由時間機器或許有其可能性，而且如果存在的話，不知道其性質是否像電力那麼簡單………只要探討這些就夠了，從這裏我們可以利用某種程度的科學知識，再去好好地展開幻想的翅膀。



第68圖 負質量永遠在追正質量？

七、宇宙天際的故事

在關於相對性理論是否有矛盾的初期的爭論上，這個問題（時鐘的矛盾）扮演了重要的角色。（C．梅勒）

用"時間停滯"回復青春？

在這裏我們將要解答（時間停滯）這個謎。在相對性理論衆多的矛盾之中，再也沒有比這種（時間停滯）之謎，亦即"時鐘的矛盾"更令人覺得有趣和難以理解。所謂矛盾乍看起來不可思議，但是深一層去探討的話，它仍然是有根據的。

（時間停滯）是很奇妙的，我們在第三章已經有詳細說明過，這裏我們再重複溫習一遍。首先請你回憶一下特殊相對性理論裏有"時間停滯"的現象，運動狀態的物體的時鐘和觀測物體的人所拿的靜止狀態的時鐘比較，會發生延遲的現象，亦即時間進行緩慢，這是一般常識所沒有的現象。

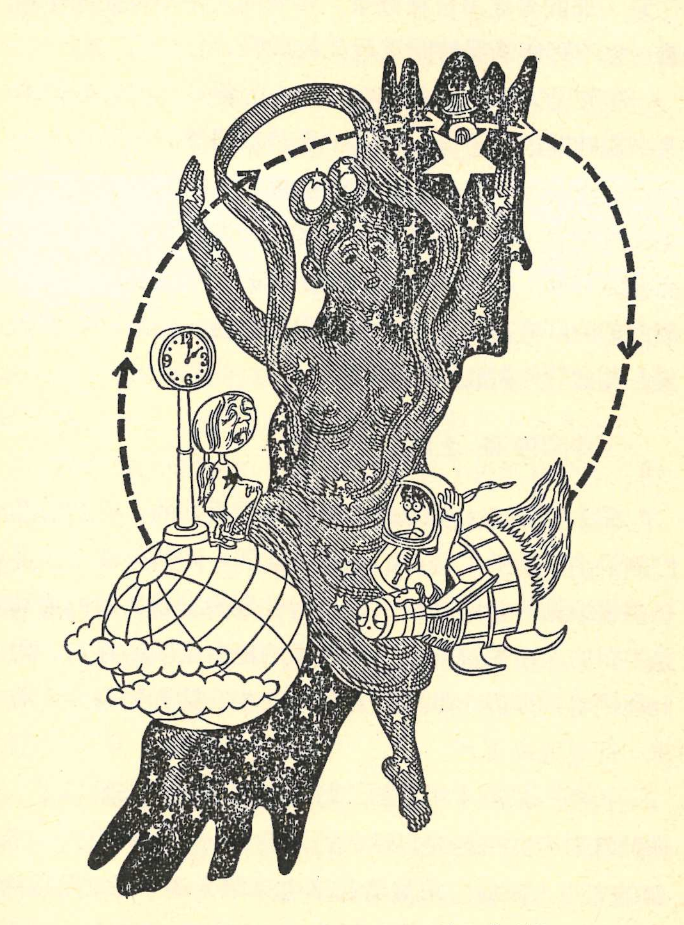
這種時間是的延遲在運動速度比光速小的時候幾乎是不清楚的，但是在基本粒子物理學所說的宇宙線，或是出現於科幻小說中的恒星間旅行用光子太空船等速度

極接近光速的物體上則非常清楚地顯示出來，時針的移動，亦即時間的經過爲十分之一或百分之一，這是相對性理論的結論。因此，坐著準光速的太空船到遠方的星球旅行回到地球的太空人，比起在地球等待他回家的家人，年齡的增加要慢很多。

到太空旅行的太空人和愛人約定在三年後結婚，但是等他在三年後回到地球時，他的愛人已經是一個超過六十歲的老太婆了。這樣的故事不少，他們取名爲（時間停滯），這種現象確實非常神秘而又不合常理，眞的會發生這種事嗎？任何人都會對它產生疑問。但是這種時間停滯的現象事實上是可能發生的，至少基本粒子論方面已經有某種程度的查證。

由於人類到月球或火星都是花費了不少的精力才達成的，因此關於太空旅行，雖然目前在實驗方面還沒有確認，然而大部分的物理專家們都承認這種（時間停滯）效果的眞實性。這種現象對於我們來說或許是一個不可思議的事實，但是愛因斯坦的相對性理論，已經打破牛頓時代的想法絕對時間的概念，亦即不管在宇宙的任何地方、或任何坐標系，時間都是同樣經過的概念，而如果我們承認相對性理論，那麼對於（時間停滯）也應該加以承認才對。

不過這裏仍然有一個問題容易被誤解，還請大家要



第69圖　眞的會發生<時間停滯>的記錄嗎？

注意。那就是經由這種效果，年老的人決不可能返老還童，也不可能感覺時間進行比較緩慢。

不管是太空人或是留在地球上的愛人，對於他們本身來說時間的經過是一樣的，歲月以同樣的速度經過，說不定由於太空船內的生活環境較差，勞累較多使肉體老化的更快。相對性理論所說的“時間停滯”並沒有感覺上的不同，只是在地球上以正確的方法觀測時，太空船內的時間看起來比地球移動較爲緩慢，結果才發生和愛人相會時年齡差距的悲劇。

〈時間停滯〉之謎

愛人變成老太婆的故事實在是很微妙的，但是前面已經說過，對於“時鐘的矛盾”亦即（時間停滯）之謎仍然需要進一步去探討。在相對性理論上很明顯的運動是相對的，由於沒有像牛頓那樣的絕對空間的存在，因此即使看起來靜止狀態的東西，從坐在運動物體的人看來，卻是運動著。

這麼一來剛才所說的（時間停滯）就無法解釋了，從地球看來太空船是以準光速運動著，相反地對於太空船的太空人來說，地球看起來也以準光速，而且是以同樣的路線和速度運動著。因此以太空船爲基準來計算“時間停滯”時，地球上的時間移動緩慢，太空人很快地

超過六十歲。

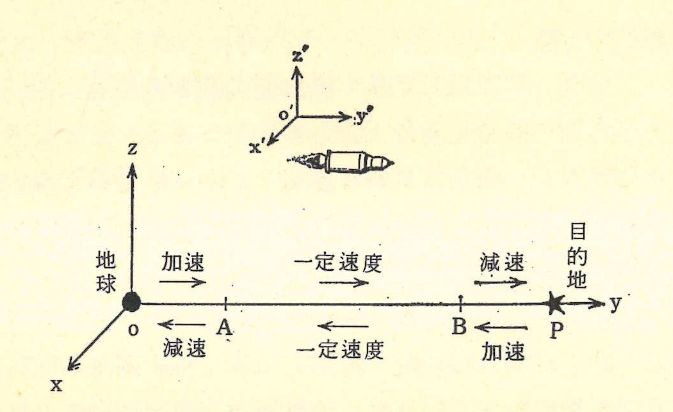
這是一個明顯的矛盾。既然他們還會再相會，因此不可能雙方都是正確的，雙方都不可能認爲自己比對方年輕或年老，究竟這是爲什麼呢？以上雖然是第三章的重複，總之這就是（時間停滯）之謎，也是“時鐘的矛盾”。

理解這種矛盾的眞正意義是很困難的，即使一些專家之間也經常議論紛紛。也有人主張（時間停滯）既然具特殊相對性理論的結果，如果應用在更難理解的一般相對性理論上，或許就不會發生這種時間上的悲劇。

但是即使應用在一般相對性理論，仍然會發生（時間停滯），而且無論如何其結論是留在地球上的愛人年齡會較大。理論上的說明雖然很困難，但是經由第 70 圖的模型，我們從地球和太空船兩方面來簡單地說明一般相對性理論的（時間停滯）現象。當我們乘坐光子太空船到遠方的恒星進行太空旅行時，最簡單而且具有實現性的速度，如第 70 圖所示。

從 O 位置的地球出發的太空船，以一定的力量加速度，沿著 Y 軸一直線前進，在 A 點達到準光速。達到準光速時關掉引擎，暫時以一定的速度繼續飛行，到達 B 點時開始減速，然後在目的地 P 點的星球上停止。

歸途也完全相同，從 P 到 B 爲加速，B 到 A 爲一定



第70圖 <時間停滯>之謎

的準光速，然後A到故鄉的地球O則進行減速。以這種圖表來計算XYZ座標系，亦即從地球或目的地星球的座標所看到的（時間停滯），由於A到B之間是一定速度，因此可以直接應用特殊相對性理論，有名的 $\sqrt{1-(v/c)^2}$ 算出太空船的時鐘延遲。

問題是O和A及B和P之間的加速和減速的期間，但是這些可以用第三章所敘述的階段式的方法來找出答案，然後將這些全部加起來，就可以求得相見時彼此年齡的差別，也可以知道太空船上的人是比較年輕的。

在圖形中，如果O～A之間或B～P之間距離非常小，全程可以用一定速度飛行，$\sqrt{1-(v/c)^2}$ 可以直接將經過時間的差別顯示出來。相反的如果A～B之間距離非常小，加速後立刻進入減速，那麼就和第三章所說明的1G的重力經常作用的加速度相同。

像這樣從和地球連結的座標XYZ看來，（時間停滯）清楚地出現，也就可以正確地計算出來。那麼從另一方面看起來又是如何呢？亦即以太空船爲基準所做的觀測，如果以一般相對論的想法，應該可以做如下的說明。

我們假設以準光速飛行的光子太空船的座標系 $X^1Y^1Z^1$ 爲基準，太空船經常在這個座標的原點 O^1。座標 $X^1Y^1Z^1$ 對於XYZ來說是運動著的，但是從 $X^1Y^1Z^1$，亦即太空船看來則XYZ是移動著的。如果站在這種立場，則加速區間O～A之間太空船有一定的重力作用，立即有重力場存在，在O的地球和其重力場朝著 Y^1 軸的負方向自由落下。

其次A～B之間太空船內沒有重力，地球觀測起來好像以一定速度在 Y^1 上做慣性運動。太空船在B～P之間的重力剛好和O～A之間相反，地球沿著 Y^1 軸移動，而且經由其重力逐漸減速，到達P點時看起來是靜止的。

從太空船看歸途也是一樣，地球最初朝向 Y^1 軸的正方向自由落下，然後經由慣性運動，在最後階段被重力場止住，剛好停止下來。

從一般相對性理論來說，運動於重力場的時鐘和移動方式，不僅和速度有關，也和重力場的強度，重力場和時鐘之間的距離有關。當速度爲零時，時鐘的移動方式決定於重力和距離，從遠方觀測重力星球附近的時鐘，看起來是緩慢移動的，這點我們剛才已經說過，而且重力星球的光線看起來向紅色的方向偏移，也是因爲這種理由而發生的現象。

將這個原理應用在現在的情況，由於地球在重力場內以某種速度移動，因此可以經由其速度，重力的強度以及和船的距離來找出答案，還好其結果和以地球爲基準的特殊相對論所想到的結果完全一致。

A～B之間確實是相對的原理，因此計算時地球的時間的移動較爲緩慢，但是主要是B～P之間的重力（亦即太空船加速、減速所產生的力量）影響很大，抵消了地球時間緩慢的程度，結果還是太空船的太空人比較年輕。

這麼一來（時間停滯）不管是從地球或是太空船觀測，計算起來都是一樣的，所謂時間的矛盾就可以解決了。從太空船來考慮一般相對性理論時，其中最大的要素並不是速度，而是剛才所說的重力的強度和距離，而這種由重力和距離所決定的量，我們稱爲位。也是在第六章所談到的量。

這裏所說的位，只是一種大小而沒有方向的階段潛力，在一般相對性理論上是最簡單的例子。

奇妙的離心力和馬赫原理

以上終於解決了（時間停滯）之謎和“時鐘的矛盾”，但是我想還有許多讀者不太了解。如果光說應用一般相對性理論的理論公式，是沒有什麼說服力的，有人會覺得如墜五里霧中，也有人認爲光是公式的結果是無法說明清楚的，的確如此。

經由太空的加速，船內產生重力場，於是地球的重力位表現出來，在B～P之間形成很大的作用，像這樣的說明，一般認爲很難抓住物理上基本的意義。關於這個基本的問題，很多人一直想進一步去說明，而且經常發生爭論，尤其是一些不是專門的人，對於這個基本問題的印象極爲模糊，不過我們還是要繼續說明下去。

從運動方面來看，地球和太空船確實是相對的，並沒有任何錯誤，但是如果眞的是完全相對的，爲什麼太空船需要搭載引擎呢？

地球不需要有任何舉動，而只有太空船要拼命地加速或減速，這可以說是相對的嗎？事實上不是相對吧！

但是在相對性理論上，不管是特殊相對性理論或是一般相對性理論，都是要求以「萬物的運動是相對的」

爲出發點，如果承認這個要求，那就不能說不是相對的了。

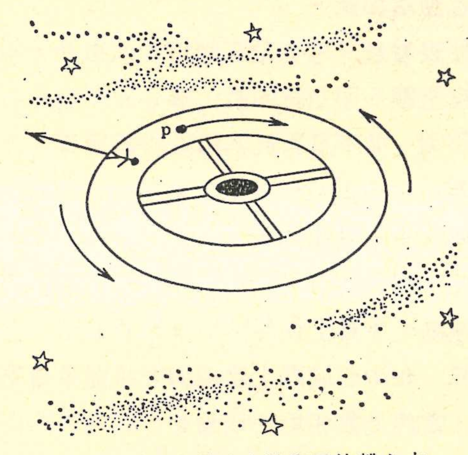
不過還有一點，那就是我們應該考慮到除了地球和太空船以外，還有其他的東西存在，而這個其他的東西並不是指附近的星球或太空船，因爲受這些的影響很小，這裏所說的第三者的存在指的是“宇宙全體”，儘管地球和太空船彼此進行相對運動，對於“宇宙全體”來說，其運動方式是有差別的，而這個差別正是解開（時間停滯）之謎的重要關鍵。

對於「宇宙全體的運動」這種想法和所謂的“音速的原理”有關，也是引起各種議論的思想，在這裏我們將儘量簡單地說明。

首先想一想影響迴轉的人造衛星的離心力。如第71圖，假設有一個人站在環狀的人造衛星外側的牆壁上，造衛星開始迴轉時，這個人由於受到離心力而被甩出去，這種力量一般也稱爲人造重力。

但是如果人以同樣的速度朝著和衛星迴轉相反的方向（如P）奔跑的話，又是如何呢？由於從外而看來是靜止的，對於奔跑的人離心力並沒有作用，但是這個人如果以衛星爲基準，他應該是迴轉著，這麼一來人造衛星的迴轉就有問題了。

即使說是迴轉，問題在於從那一種角度來看迴轉，



第71圖　迴轉的人造衛星的離心力

如果從朝著相反方向迴轉的人造衛星看來是迴轉，從地球看來或許是靜止的，以上的說法確實使頭腦非常混亂，而使混亂的頭腦能夠清醒的最好方法，就是以“宇宙全體”爲基準。

眼光放遠一點，不要以附近的行星或人工物品爲對象，我們來看一看銀河系以外的其他的星球。這些星球（有很多是眼睛無法看到的）即使部份稍微移動，但整個來說是一個巨大而安定的結構，不會發生所有的星星一下子往北極星的四周集中，或是只有安德羅梅達星雲突然朝相反的方向移動的現象，因此人造衛星的迴轉必須以整個星星的世界，亦即“宇宙全體”爲基準來看，

事實上也應該如此。

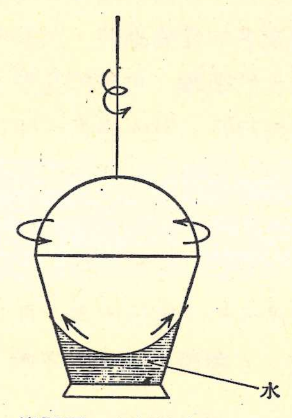
從外表看起來感覺是在迴轉的人物P，如果不是對於“宇宙全體”而迴轉的話，離心力不會有作用。離心力是否作用，並不是對於其附近的牆壁或人工物品而言是否迴轉，而是對於代表遠方星星的“宇宙全體”而言是否迴轉，由這點來決定。

因此在相對論上，人造衛星和“宇宙全體”是進行相對的運動，事實上從理論上來推算的話，經由迴轉遠方的星星，在中心成靜止狀態的人造衛星會受到離心力的影響，當然光靠相對性理論是否能夠推算出整個宇宙，還是一個問題。

以上所敍述的離心力的相對性，有牛頓的水桶實驗和反駁牛頓的馬赫所提出的理論，雙方都在物理學思想史上留下了功不可沒的軌跡，同時離心力的相對性也是愛因斯坦的思想的出發點上一個重要的問題，現在我們簡單地說明一下。

牛頓在其大著（原理）中，以如第72圖的水桶做迴轉實驗，證明絕對空間的存在。這本書的內容很難理解，同時也顯示出牛頓對於絕對空間的存在這個問題相當煩惱，他的目的是想經由離心力的測量，來證明絕對空間和絕對迴轉的關係。

旋轉吊著的水桶時，裏面的水會向外測湧起，這種



第72圖　牛頓的水桶

現象並不是經由水桶對於水而言是如何迴轉來決定，而是在某一個其他的基準——亦即絕對空間——之下經由水的運動所決定的，亦即僅在絕對運動之下才發生這種現象。

這樣的論述看起來堅固而沒有反駁的餘地，但是世上總是有先見之明的人物存在，對於牛頓的這種思考實驗，同時代的英國名哲學家巴格雷主教提出下列的相反意見。

「由於絕對空間不可能觀測，所以不能夠被接受，離心力是水對於恒星系（相對的）迴轉所產生的現象」

這種見解雖然隨著牛頓權威的確立而逐漸衰微下去

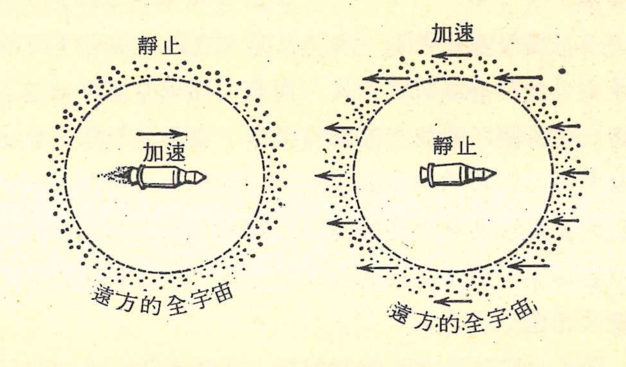
，但是百數十年之後，經由以超音速馬赫數及被列寧批評為馬赫主義而成名的愛倫斯特‧馬赫的重新提議，給物理學界一個很大的衝擊，馬赫的見解在關於離心力上和巴格雷主教完全相同。對於絕對空間，水不是進行絕對的迴轉，而是對於宇宙的全體物質相對地迴轉。

這種思想影響近代物理學很大，因為在愛因斯坦樹立相對性理論時，將這種想法當做一個根據。同時愛因斯坦將這種想法命名為“馬赫原理”極為重視，並對馬赫本人十分尊敬。（聽說馬赫本人不想承認愛因斯坦的相對性理論）

地球和太空船並不是相對的！

前面說過，和“宇宙全體”相對地運動這種馬赫的思想，才是解開（時間停滯）之謎的關鍵，對於一直線上的加速只要應用這種想法就可以了。這種想法非常簡單，請看第 73 圖。下圖為通常考慮的情況，太空船以自己的引擎和燃料加速，這種加速運動並不是無意的加速，而是對於全宇宙的加速。

在太空船存在的地點，有由全宇宙的全部物質所形成的場，因為對於這個場加速，太空船無論如何要受到抵抗，這種抵抗是經由加速所形成的外表的重力。但是地球對於全宇宙並沒有加速，或許會移動，但也只是很



第73圖　太空船加速和宇宙加速結果一樣？

微小，同時等速度運動和力量不發生關係，因此是不成問題的。這麼一來，我們可以理解到地球和太空船的運動決不是同等的。

兩者對於全宇宙的運動的方式不同，對於全宇宙，地球並沒有加速，只有太空船加速，所以太空船內的時間較慢。

圖右和圖左剛好相反，太空船停止而全宇宙加速。如果太空船的運動是對於全宇宙的相對運動，那麼即使全宇宙加速，也會發生相同的現象，而右圖太空船裏面也會發生重力（離心力的情況也一樣，但是光靠愛因斯坦的理論是否能夠完全說明全宇宙的相對運動，目前還

不清楚）。

以上將困擾我們的（時間停滯）之謎，亦即“時鐘的矛盾”並不是以數學公式，而是以簡單的道理來加以說明，而這種好像很有道理的說明，也剛好解釋了馬赫的原理，但是我們仍然要注意，宇宙是充滿神秘的，不知道什麼新的現象會被發現，新的理論會被建立。總之，儘早實現人類太空旅行的夢想，嚐一嚐和變成老太婆的愛人相會的滋味。

從下一節開始我們做個總結，探討有關宇宙的問題。上面的文章裏經常用到“全宇宙”或“宇宙全體”這些用語，我們就針對這種全宇宙或宇宙全體來加以說明。

千變萬化的宇宙

宇宙到底是什麼？先從物質和形狀這兩方面來考慮，我們所住的這個宇宙的形態非常曖昧，其行動也是不可以理解的。宇宙到底是什麼——最近有很多人會問到這個問題，而且由於無法得到適當的答案而煩惱。古時候的人一生當中都不會對這個問題產生疑問或煩惱，他們是幸福多了，當然那時的人類並沒有現在那麼進步。

目前當然也有人對於這種如夢般的問題不去關心，但是自從愛因斯坦出現以後，敍述關於宇宙形態的書出版很多，而且隨著阿波羅登陸月球，有不少人會在一生

當中考慮幾次宇宙的問題。

我想只要一次就可以，對於這種困難的問題去動一動腦筋是很重要的，因爲除了日常所接觸的世界外，可以經由窺視另一個世界使你胸襟更開濶，眼光看的更遠，當然除了專家以外，過度去考慮這個問題也不太好，因爲即使是現代的科學，目前仍然有許多現象還無法解釋，要描繪出所能理解的宇宙形態並不是一件容易的事，在情緒惡化之前，或許你還要考慮放棄。從下面開始，我們將以較輕鬆的口吻來探討“宇宙”這個問題。

剛才我們說過，古時候的人對於宇宙這個東西並沒有特別去煩惱過，而只有少數天才的人物，才會徹底地去思索這個問題，結果隨著歷史的演變，各種宇宙的形像逐漸被挖掘出來，這是人類思想上一股巨大的洪流。

根據梅遜的（科學的歷史），古代文明發達的時候，美索不達米亞人認爲天地是由在水面上的平坦的圓盤和半球所形成的，古代的埃及人則認爲是一個長方形的箱子，古代的希臘想像天空像樹皮一樣包圍著圓柱狀的大地的四周，中國則已有天爲稍微傾斜的半球，地爲凸面狀的正方形的學說存在。

隨著思考程度的進步，形像也就逐漸趨向合理化。畢達哥拉斯認爲大地和宇宙全體都是球形，柏拉圖加以擴大，創造出數學的體系，亞里斯多德也有很多的貢獻

。這種系統合理的數學的宇宙像，在二世紀的托勒密的天文學上達到最高的精密程度，其權威性一直影響至十六世紀。

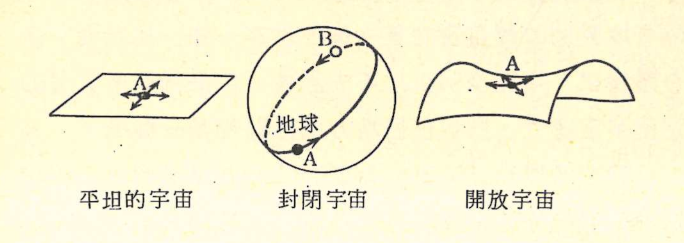
但是從十六世紀開始，科學的知識進入了具有歷史的宇宙像，首先哥白尼倡導“太陽中心”的學說，成爲康德的“哥白尼迴轉”的成語。這個學說被刻卜勒所承繼，最後成爲牛頓萬有引力學說有力的根據。

對於相對性理論以前的古典的宇宙像，僅管有不少如馬赫或巴格雷的批判，但是仍然無法很快地脫離出刻卜勒——牛頓的思想。雖然天體的觀測非常進步，但是對於整個宇宙的探討，人類還沒有能夠找出一個偉大的理論。

思索宇宙的全體和宇宙的邊際，引導出眞正眞科學的宇宙像，是在經由愛因斯坦的思索後才出現的。

愛因斯坦的宇宙和德．古塔的宇宙

愛因斯坦在一九一六年確立一般相對性理論，同時在理論上預言重力波的存在，一九一七年他又將一般相對性理論應用於宇宙方面，發表一種相對論的宇宙像，目前被稱爲“愛因斯坦的宇宙”，是相對性理論上最古典的宇宙像，其幻想的性質和科幻小說迷所夢想的是相通的，首先我們來談一談“愛斯斯坦的宇宙”。



第74圖 開放宇宙和封閉宇宙的二次元模型

宇宙以形狀來表示的話，可分別爲平坦的宇宙，密閉的宇宙和開放的宇宙三種，如第 74 圖，相信有不少人應該知道。由於以圖形來表示三次元的彎曲空間相當困難，所以我們用二次元的模型來表示，由距離的關係、位置的關係等到擴大至三次元。

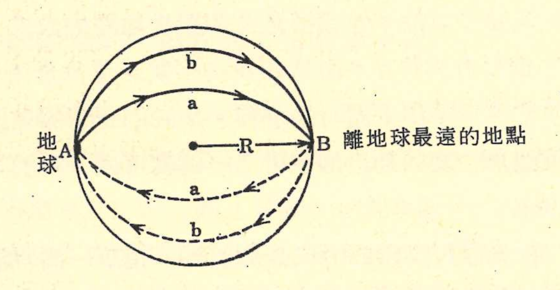
左邊平坦的宇宙模型是在相對性理論的公式上，假定宇宙沒有物質存在時所出現的形狀，這也是用牛頓的力學來思索宇宙全體時的解釋。中間的封閉的球面狀宇宙模型爲“愛因斯坦的宇宙”，這種可由下列的假定引導出來。

首先假設宇宙的形成是均質的。在某一個特定的場所星球聚集而其他地方卻沒有，或從某一個地點開始就行不通等不平等的宇宙我們不列入考慮範圍。

當然眞正的宇宙是有太陽、有地球、也有銀河等，隨著地點的改變質量的集中情況也不一樣，但是從宇宙全體看來，這種差別可以不去理會。如果我們所假定的這個宇宙成立，則以任何地方爲原點都是一樣的。

第二個假設是宇宙的狀態在時間上沒有變化。所謂狀態感覺起來非常抽象，但具體的說是將大小、物質的密度，星球以及星球間的物質視爲流體時，假定其壓力一定不變。

以上面的兩項假定爲基礎來解釋一般相對性理論的方程式，可以出現兩種答案（亦即兩種宇宙形態）。其中之一是宇宙的任何地方都可以進行有限時間的旅行，光的頻率不因位置而變化，也稱爲“愛因斯坦的宇宙”。“愛因斯坦的宇宙”在衆多相對論的宇宙形態中，可以說是最普遍最有趣的。



第75圖　愛因斯坦的宇宙（半徑R的二次元模型）

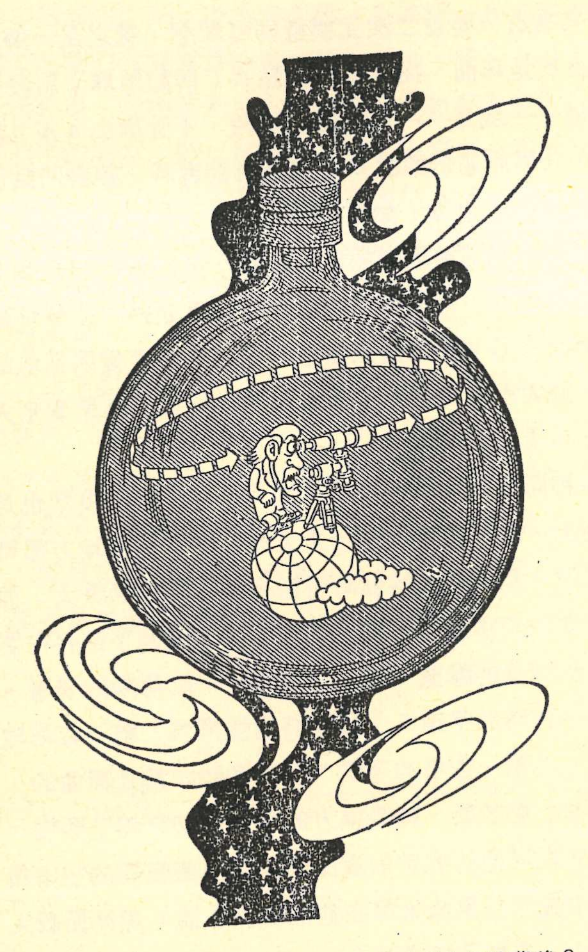
其構造只要看二次元模型即可理解，總之是一個球面，由於是球面，從宇宙的一點A（例如地球）出發的太空船——或光——一直線前進時，不管經由a或b航線，不久將到達的地點B，如果再前進時，就會回到原來的地方——地球（如第75圖）。

如果人類有很理想的望遠鏡時，或許還可能觀看自己後面的姿態，“愛因斯坦的宇宙”就是因爲這種神秘的特徵而有名。如果這個模型是正確的，“愛因斯坦的宇宙”的大小可由其半徑演算出來，從觀測結果看來大約是七百億光年。

從相同的假定的引導出來的另一種宇宙的模型也是很有名的，這個模型的特色是光從原點（任何地方都可以）出發，到達任何地點時所需要的時間爲無限大，而且隨地點而頻率會有不同。換句話說，這個宇宙存在著永遠無法到達的障壁，其名稱取自於一位荷蘭的學者，叫“德・吉塔的宇宙”，而且將障壁稱爲“德・吉塔地平線”。“德・吉塔的宇宙”空間和時間都是彎曲的，會發生都卜勒效果，越是遠方的時鐘看起來越是緩慢。

對於從同樣的假定引導出來的這兩個寂靜的宇宙模型，日本鬼才小栗蟲太郎在他的偵探小說（黑死館殺人事件）中，有如下的描述：

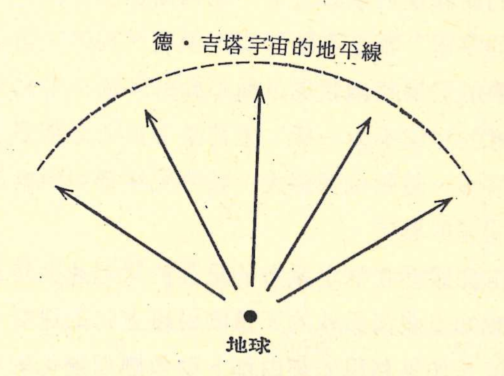
「那麼首先從反太陽學說談起，愛因斯坦認爲太陽



第76圖 在封閉的宇宙裏面可以看到自己的背後？

的光線環繞球狀宇宙的邊緣，然後再回到原來的地方。因此在最初達到宇宙的極限時，在那裏製作第一個像，然後再繼續幾百萬年的旅程環繞球的外圈後，來到相當於背後的對向點，在那裏製作第二個像。但是那個時候，太陽已經死滅；只不過是一個黑暗的星球。

亦即和那個映像對稱的實體，已經不存在於天體的世界，爲什麼呢？久我先生，儘管實體死滅，過去的映像卻出現——這種因果關係，不是剛好和算哲博士和六人的死者的關係相似嗎？當然一邊是（10^{-8}公分），另一邊則是一億兆哩，但是其對照在世界空間上，只不過是一微小線分的問題。



第77圖 德・吉塔的宇宙裏有光無法到達的地平線

然後吉塔是這麼改正他的學說的。越遠的地方由於螺旋狀星雲的光譜線朝紅色的方向移動，因此他推斷光線的頻率會變慢，當達到宇宙的極限時光速爲零，於是行進突然停止。所以映在宇宙邊緣的像只有一個，大概和實體沒有差別。而我們從這兩種理論當中，必須選擇點示圖的原理。

愛因斯坦和吉塔大概沒有料想到自己的學說會出現在偵探小說裏面，總之這兩個神秘的宇宙像，給予當時的知識份子很大的衝擊。

哈柏爾的法則和歐爾貝斯的反論

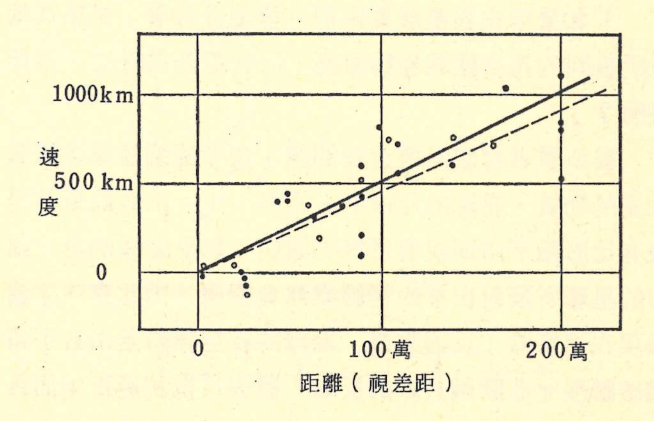
我們從假定可以知道，“愛因斯坦的宇宙”和“德・吉塔的宇宙”都是不動的宇宙模型、靜的宇宙像，但是天文學的發展陸續發現這種不動的宇宙模型和我們所住的現實的宇宙不太一樣，尤其是宇宙逐漸膨脹這種學說被確信後，差別也就更大，我們現在簡單地來說明關於這個問題的歷史。

宇宙膨脹是在測定遠方的星雲的後退速度時被發現的。要想知道銀河系外的天體的視線方向的速度是極困難的，但是如果利用光經由都卜勒效應而變化的現象，應該能夠推算速度的概略值。都卜勒效應在特殊相對性理論中也提到過，是在前世紀初經由都卜勒所發現。是

一種音的周波數隨速度而變化的現象，光也同樣可以這麼說。

一九一〇年代的天文學者史萊發測定這種光譜線的差異，發現銀河系外的島宇宙以相當的速度遠離，這是天文學界的大發現。後來美國名天文學家哈柏爾認爲速度和至島宇宙的距離有關，並且發現其間有一定的法則——哈柏爾法則——存在。膨脹的宇宙即將在我們的眼前展現出巨大而有力的姿態。

哈柏爾經由其本人所確立的距離測定法，測出至遠方的島宇宙的距離，並且將測定的結果和島宇宙移動的速度整理出來，作成如第 78 圖的圖表，說明距離和速



第78圖　E．哈柏爾的法則圖（數值後來被變更）

度之間有個明顯的法則存在，圖表的數值雖然經由哈柏爾以後的詳細觀測資料而加以修正，但是一般認爲這個法則是正確的。亦即天體越是遙遠，則以很快的速度向後退。

要說明這種正規的現象，只能用“宇宙的膨脹”這句話，對宇宙逐漸膨脹產生懷疑的人，目前幾乎沒有。

“歐爾貝斯的反論”雖然和“哈柏爾法則”在性質上有很大的差別，但是在證明膨脹的宇宙上經常被引用，而且由於這是非常有名的反論，知道的讀者應該不少。十九世紀初葉，德國的天文學家海因利赫。歐爾貝斯所提出的反論，簡單說來如下。

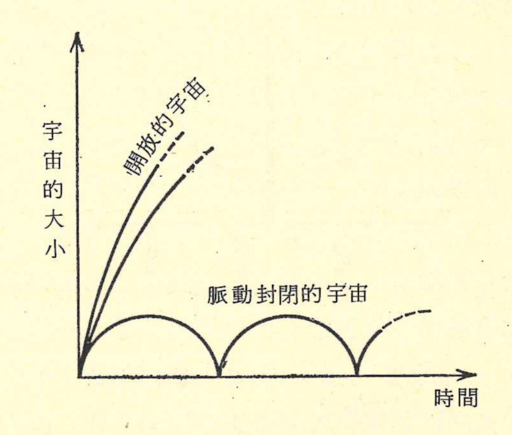
「如果宇宙裏星球無限而一樣地分佈著，那麼從地球所看到的星空應該極爲明亮，但實際是很暗的，爲什麼呢？」

很多學者都想回答這個問題，也考慮到星球之間吸收光的物質，星球的分佈不一樣等……。但是結果還是沒有比膨漲宇宙學說有更好的說明。如果膨漲的話，遠方的星球所發射出來的光線當然會變弱，因此夜空才會像現在這麼暗；反過來說，地球的夜空黑暗是由於宇宙繼續膨漲。“歐爾貝斯的反論”發表以後經過百年而再度復活，成爲現代宇宙論的基礎“宇宙膨漲說”的有力支柱。

動的宇宙、膨脹的宇宙

前面說過“愛因斯坦的宇宙”和“德・吉塔的宇宙”都是靜的宇宙模型，而實際上所觀測到的宇宙則是動的宇宙。因此，從相對論引導出來的解答也不是靜的宇宙，而是動的宇宙像。一九二二年經由蘇俄學者佛利德曼的研究，獲得“動的宇宙”的解答。

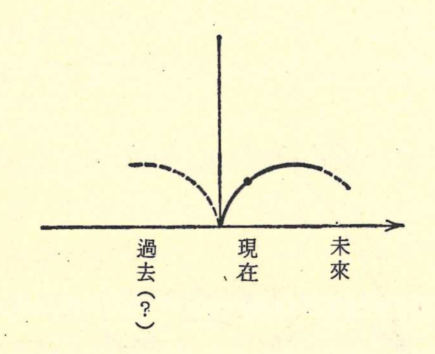
佛利德曼在前述的兩個假定之中，將第二個假定從靜的變更爲動的，亦即假定宇宙的大小在時間上有變化，解出愛因斯坦的方程式，發表三種類的“動的宇宙”可能存在。



第79圖　佛利德曼的動的宇宙

如圖解所顯示的，在三種類的解答之中，有一種是隨著時間的經過而無限變大的宇宙像，在幾何學上是開放的宇宙。另外一種則是重複大小變化的“脈動的宇宙”，幾何學上和靜的宇宙相同，爲封閉的宇宙。第三種介於前面兩種之間，仍然屬於開放的宇宙（第79圖）。

佛利德曼的解釋如果出現眞實的宇宙，那麼逐漸膨漲的現在的宇宙，如第 79 圖上部的曲線或第 80 圖的點線，爲脈動曲線的膨漲部分。總之“佛利德曼的宇宙”可以說是能夠說明逐漸膨漲的觀測結果的模型。一般相對論所追求的具代表性的宇宙如上所述，爲了使各位看的更清楚，我們整理如下。



第80圖　光靠佛利德曼的解答不能理解進化的情況

（一樣而等方的宇宙）

A　靜的宇宙（封閉的宇宙）

①　愛因斯坦的宇宙（有限而可能環繞一周的宇宙）。

②　德・吉塔的宇宙（無法環繞一周的宇宙）

B　動的宇宙（佛利德曼的解答）

③　單調膨漲的宇宙（開放的宇宙）

④　脈動的宇宙（封閉的宇宙）

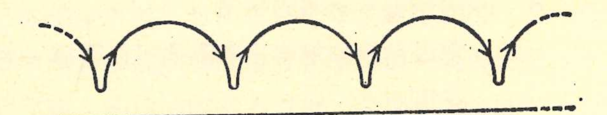
進化的宇宙

如上所述，佛利德曼的解答和逐漸膨漲的宇宙這種觀測結果並不互相矛盾，但是只經由這種數學的曲線來說明宇宙眞正的移動，是多少有點困難的，因爲無法具體記述進化的問題，宇宙生生流轉的諸相。

尤其是開始膨漲之前的天地創造的姿態，星雲的成因等，還必須從另一個方面來進一步加以說明。例如佛利德曼的解答之中“脈動的宇宙”的曲線在過去的某一個時點（假定爲百億～數百億年前），宇宙的半徑爲零。想像無大小而物質的密度無限大，空間無限彎曲的宇宙是很難的，而且要思索或許以前存在的逐漸收縮的宇宙也很難。

因此，有人提倡宇宙全體的黑洞或白洞說。

福雷德・何爾經由導入C場這種新的概念於相對性

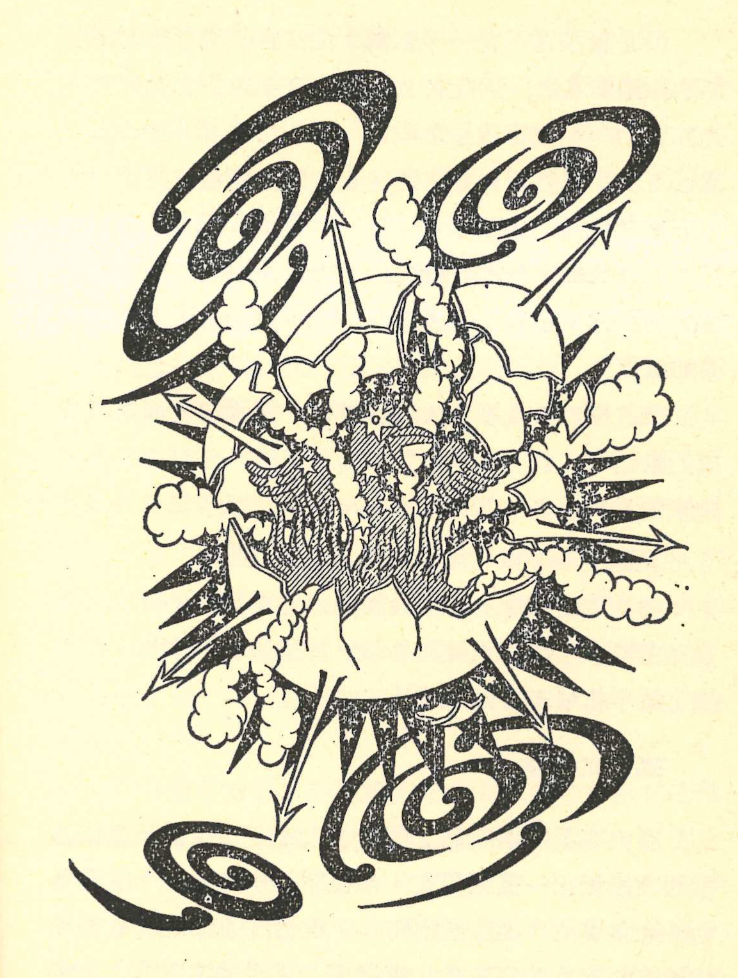


第81圖　在大小接近零之前回復膨脹的何爾的假定

理論的方式，而找出大小在變成零之前又再度轉為膨漲的解答。將這種C場概念導入時，星球在陷入時間停止的重力半徑之前，又再度彈回，這實在是一種尖端的理論，但卻無法經由觀測而證明。

為了經由物理學充實這種數學的解答，在具體討論論宇宙的進化時，通常不只是相對性理論的方程式，仍然需要應用原子物理學，基本粒子論關係的知識。這種宇宙進化論的代表著作，有比利時的學者阿貝・魯梅特的"進化的宇宙"一書。魯梅特的宇宙首先和佛利德曼的解答一樣為動的封閉的宇宙。

這個宇宙現在極大，半徑（應該是無限的）恐怕遠超過百億光年，但是很久以前，大概在數百億年前，這個宇宙非常小，是一團高熱和高密度所形成的東西，在某個時候發生某種核爆炸，然後開始急速的膨漲（稱為大爆炸）。開始膨漲不久後，爆炸的衝擊逐漸微弱，大概是物質之間萬有引力作用，膨漲的速度緩慢下來。



第82圖　宇宙經由爆炸而進化？

但是膨漲卻不是一直衰弱下去，由於我們假設物質間的距離非常大，因此在物質之間並不是引力而是排斥力在作用。如果承認這個假設，在引力和排斥力保持均衡後，排斥力克服引力作用，再度開始膨漲，從此以後一直繼續膨漲。包括銀河系的一些星雲，就是在均衡時經由大氣收縮成集團而誕生的，因此現在可以說是排斥力戰勝引力的最後的膨漲期，以上是魯梅特的宇宙進化論的概要。

像這樣經由最初的大爆炸以後，逐漸膨漲而星雲形成的動的宇宙像，其他的學者也描述過，尤其是（奇異國家的湯姆金斯）的作者喬治·格莫的說明算是最通俗，格莫甚至於想像到爆炸前的大壓縮狀態。

總之宇宙的所有物質最初爲超過高密度的團塊，然後在某時發生爆炸而開始膨漲，成爲現在的形態，這是進化的宇宙最有力的說法。

固定的宇宙

歷史在某一個時點上開始，大小、密度以及星雲的狀態逐漸變化一直到現在，然後開始邁向未來，這是魯梅特和格莫的“進化的宇宙”，但另一方面也存在著和這種完全相反的宇宙像，那就是“固定的宇宙”，宇宙不僅在空間是一樣，在時間上也是一樣，亦即是固定的，以這種思想爲基礎所提倡的宇宙。

即使在時間上沒有變化，也不是“愛因斯坦的宇宙”或“德·吉塔的宇宙”這種靜的宇宙。從觀測知道宇宙確實在發生膨漲，只是經由膨漲，物質在宇宙的各種場所不斷地創造，彌補了宇宙物質逐漸稀薄，結果是保持固定的狀態——以這種假想爲出發點。

這種說法對於被「不可能無中生有」這種因果律的固定觀念所束縛的人來說，或許很難理解，但是由於這種理論所說的物質“不斷地創造”，在局部上微小而無法觀測，因此不可能經由古老的物理學而加以反駁。

“固定的宇宙”這種正式的理論經過哈曼·龐帝、福雷、德·何爾、湯姆斯·哥德三人的議論和協力，於一九四〇年被建立。因此古時候所想像的無數的宇宙像，在目前可以分爲兩大類，一爲以大爆炸爲出發點的“進化的宇宙”，一爲經由不斷地創造而形成的“固定的宇宙”。

那一種宇宙像才是正確的呢？必須經由許多精密的觀測結果才能下判斷，根據新的觀測結果顯示，“固定的宇宙”比較可能被否定，尤其是自從一九六五年邊澤斯和威爾森發現微波的宇宙黑體放射以後，爆炸說更是牢不可破，最近的黑洞的研究也和“進化的宇宙”有關。

我們今後仍然可以期待新的天文現象的發現和大胆

的新理論的發表，因爲宇宙依然是一個神秘的世界。



039
新世紀叢書

科幻相對論

主　　編：新世紀編輯小組
審 定 者：周東川
出 版 者：銀禾出版社
發 行 人：陳俊安
總 經 銷：銀禾文化事業有限公司
地　　址：和平東路２段96巷3-1號
電　　話：7005420・7005421
郵　　撥：0736622-3
定　　價：新台幣100元
新聞局登記證局版台業字第3190號
1984年９月初版

新世紀叢書